СПЕЦВЫПУСК NANOINDUSTRY
НАНОИНДУСТРИЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
СПЕЦВЫПУСК 7s, том 14 2021
На двух языках
ISSN 1993-8578
ISSN 2687-0282 (online)
DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s

РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2021

# РОССИЙСКИЙ ФОРУМ «Микроэлектроника-2021»

7-я Научная конференция
«Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»
Сборник тезисов

Республика Крым,
г. Алушта, 03–09 октября 2021 г.

ТЕХНОСФЕРА

# НИИМЭ

**НИИ** МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В 2016 году НИИМЭ постановлением Правительства РФ было определено головным предприятием приоритетного технологического направления по электронным технологиям РФ. В этом статусе НИИМЭ осуществляет координацию деятельности научных и производственных учреждений микроэлектронной отрасли РФ по разработке и применению отечественной элементной базы в электронных изделиях российского производства под руководством академика РАН Г.Я. Красникова - руководителя Приоритетного технологического направления «Электронные технологии» РФ, академика-секретаря Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН.

**АО «НИИМЭ» – это:**

- фундаментальные исследования в области наноэлектроники
- разработка технологических процессов
- разработка микросхем и микроэлектронных модулей

Научно-исследовательскими работами в НИИМЭ занимаются свыше 600 специалистов, в том числе более 70 кандидатов и докторов наук, 3 академика и 2 члена-корреспондента РАН.

124460, Россия, Москва, Зеленоград,
улица Академика Валиева, 6, стр. 1
тел.: +7 (495) 229–70–00
niime@niime.ru
**www.niime.ru**

НАНОИНДУСТРИЯ. СПЕЦВЫПУСК 2021 (7s, том 14 (107))
Научно-технический журнал

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

**Navigationally Connected VLSIs and Modules** 57 **Навигационно-связные СБИС и модули**

Modes of the Local Navigation System Operation in the CONSUL Project. Consumers of the CONSUL System 57 Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ»
*I. L. Korneev* *И. Л. Корнеев*
*A. S. Kuznetsov* *А. С. Кузнецов*
*V. S. Korolev* *В. С. Королев*

Experience in Applying a Domestic Elementary Base when Designing the Emergency Rescue Equipment 60 Опыт применения отечественной элементной базы при проектировании аварийно-спасательной аппаратуры
*M. A. Yepifanov* *М. А. Епифанов*

Application of Neural Algorithms for Navigating Using Video Image 62 Применение нейронных алгоритмов для навигации по видеоизображению
*A. A. Zinchenko* *А. А. Зинченко*
*L. V. Novitskiy* *Л. В. Новицкий*

Evaluating the Undersampling-based Front End for the GNSS Receivers 64 Исследование применения метода полосовой дискретизации для построения аппаратуры потребителей ГНСС
*M. Yu. Klimenko* *М. Ю. Клименко*

Research on the Effective Organization of a Satellite Communication Network Based on HTS-Class Spacecraft with Multi-beam Antennas 66 Исследование вопросов эффективной организации сети спутниковой связи на базе космических аппаратов HTS-класса с многолучевыми антеннами
*G. V. Sebekin* *Г. В. Себекин*
*S. V. Makov* *С. В. Маков*
*A. A. Afonin* *А. А. Афонин*

Выпускается при содействии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования, в базу RSCI на платформе Web of Science и в Перечень ВАК (с 18.03.2016)

Редакционный совет:
И.БЕЛЯЕВ, Ю.БОРИСОВ, С.БУЛЯРСКИЙ, В.БЫКОВ, П.ВЕРНИК, В.КАНЕВСКИЙ, А.ЛАТЫШЕВ, В.ЛУКИЧЕВ, В.ЛУЧИНИН, П.МАЛЬЦЕВ, Ю.ПАРХОМЕНКО, А.РЕЗНЕВ, А.САУРОВ (гл. ред.), А.СИГОВ, В.ТЕЛЕЦ, П.ТОДУА, Ю.ЧАПЛЫГИН, И.ЯМИНСКИЙ

Главный редактор: **А.САУРОВ**
Зам. главного редактора: **А.АЛЁШИН**
Отв.секретарь: **Э.ГАЗИНА** *journal@electronics.ru*
Компьютерная верстка: **ИП Р.АВТУШЕНКО**
Дизайн: **Н.СЕМЯЧКИНА**

Отдел рекламы:
**А.ЦАПЛИН** *ats71@mail.ru*
**О.ЛАВРЕНТЬЕВА** *nano@technosphera.ru*
Сбыт: **А.МЕТЛОВ** *sales@electronics.ru*
Подписка: **Е.ЗАЙКОВА** *magazine@technosphera.ru*

Учредитель: АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
Генеральный директор: **О.КАЗАНЦЕВА**
НАНОИНДУСТРИЯ ©
Перерегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 7.09.2017 ПИ № ФС77-70992

Журнал издается 8 раз в год с 2012 года
Подписано в печать 29.09.2021

© При перепечатке ссылка на журнал «НАНОИНДУСТРИЯ» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.
Рукописи рецензируются, но не возвращаются.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
Адрес редакции:
Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2
Для писем: 125319, Москва, а/я 91
Тел.: +7 (495) 234-0110 доб. 183
Факс: +7 (495) 956-3346
E-mail: journal@electronics.ru
Internet http://www.nanoindustry.su
http://elibrary.ru
www.e.lanbook.ru

Российский форум
«Микроэлектроника-2021»
7-я Научная конференция
«Электронная компонентная база
и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов
Республика Крым, г. Алушта,
03–09 октября 2021 г.

Почетный президент Конференции
«ЭКБ и микроэлектронные модули»,
сопредседатель Президиума, председатель
Программного комитета Форума, руководитель
приоритетного технологического направления РФ
по электронным технологиям, академик РАН
Г.Я. Красников

Сопредседатель Оргкомитета Форума
генеральный директор АО «НИИМА «Прогресс»
З.К. Кондрашов

Организаторы
АО «НИИМЭ»
АО «НИИМА «Прогресс»

Генеральный партнер
АО «Элемент»

При поддержке
Министерство промышленности и торговли
Российской Федерации
Государственная корпорация «Ростех»
Министерство науки и образования Российской
Федерации
Генеральный информационный партнер
АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»

Оператор Форума
Компания «ПрофКонференции»

За достоверность и полноту сведений, изложенных
в публикациях, за качество иллюстраций,
за точность библиографии, а также информации
по цитируемой литературе несут ответственность
авторы статей.

Temperature Compensated SAW Filters with Increased Selectivity for Navigation and Communication Equipment and Modules
*O. V. Mashinin*
*S. S. Dorofeeva*
*T. V. Sinitsina*
68 Термостабильные фильтры на ПАВ с повышенной избирательностью для навигационно-связного оборудования и модулей
*О. В. Машинин*
*С. С. Дорофеева*
*Т. В. Синицына*

**High-performance Computation Systems**
**72 Высокопроизводительные вычислительные системы**

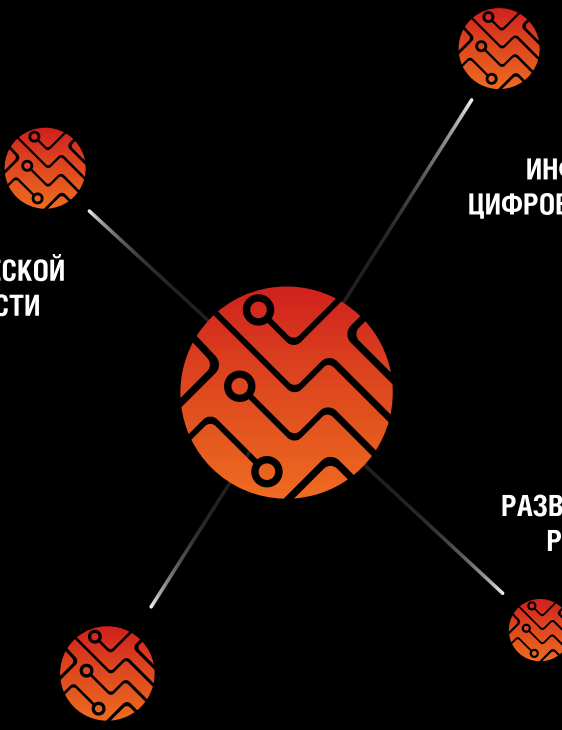
Designing a Family of Microcontrollers for Public and Commercial Identification, Storage and Authentication
*A. V. Lebedev*
72 Проектирование семейства микроконтроллеров для применения в системах идентификации, хранения и аутентификации в государственном и коммерческом секторе
*А. В. Лебедев*

Hardware-based Solution for Information Security in the Internet of Things Using Russian Cryptography
*A. A. Samoylov*
*V. L. Sergeev*
74 ПАК защиты информации в Интернете вещей с использованием российской криптографии
*А. А. Самойлов*
*В. Л. Сергеев*

Developing a Secure NE32 Hardware Platform Based on RISC-V Architecture for Use as Part of Trusted Microcontrollers
*A. V. Nuykin*
*A. S. Kravtsov*
*E. S. Vasilev*
*A. V. Gordienko*
76 Развитие защищенной аппаратной платформы NE32 на базе архитектуры RISC-V для применения в составе доверенных микроконтроллеров
*А. В. Нуйкин*
*А. С. Кравцов*
*Е. С. Васильев*
*А. В. Гордиенко*

Machine Learning Methods for Microprocessor Functional Verification
*N. A. Grevtsev*
*P. A. Chibisov*
*S. S. Shumilin*
79 Применение методов машинного обучения для функциональной верификации микропроцессора
*Н. А. Гревцев*
*П. А. Чибисов*
*С. С. Шумилин*

# КЛЮЧЕВОЙ Элемент



ИНФРАСТРУКТУРЫ
ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
НЕЗАВИСИМОСТИ

РАЗВИТИЯ ЭКСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ЭКБ

РАЗВИТИЯ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ РФ

ПРЕСНЕНСКАЯ НАБ., 12, БАШНЯ ФЕДЕРАЦИЯ «ВОСТОК» +7 495 770 0 333 www.elementec.ru

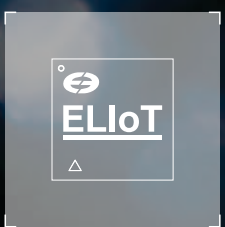
# Микросхемы
# АО НПЦ «ЭЛВИС»

## ROBODEUS – 50-ЯДЕРНАЯ ГЕТЕРОГЕННАЯ СнК ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ И РОБОТОТЕХНИКИ

СнК RoboDeus обеспечивает производительность алгоритмов искусственного интеллекта на основе нейронных сетей на уровне 16 TFlops и предназначена для построения интеллектуальных мультисенсорных встраиваемых систем.

## «СКИФ» – СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ И ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ, НАВИГАЦИИ И МУЛЬТИМЕДИА

СнК «Скиф» предназначена для построения телекоммуникационных, навигационных, мультимедийных приложений, мульти-сенсорной обработки сигналов, робототехнических систем, планшетов, умных камер, систем мониторинга.



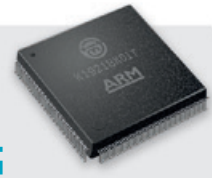

## «ЭЛИОТ» – СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

СнК «Элиот», предназначенная для применения в условиях ограниченного энергопотребления и обеспечения доверенности в IoT-сетях.

# ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ РАЗРАБОТЧИК И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ КЛЮЧЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

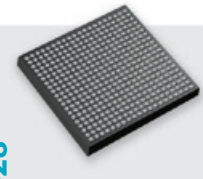
**Микросхемы в пластике: высокопроизводительные, универсальные, низкопотребляющие МК, DSP, ЦАП, АЦП, СБИС аналогового интерфейса, DC-DC преобразователи, ШИМ-контроллеры, микросхемы LED-драйверов, драйверы GaN, MOSFET транзисторов.**

## K1921BK01T



**Универсальный** 32-разрядный микроконтроллер на базе ядра ARM-Cortex M4F и встроенной Flash объемом 1 Мбайт (тактовая частота — 100 МГц, ADC, PWM, поддержка интерфейсов USB 2.0, Ethernet 10/100 MII, CAN, I2C, SCI, SPI)

## K1946BK028



**Высокопроизводительный** 32-разрядный микроконтроллер на базе ядра ARM-Cortex M4F и встроенной Flash объемом 2 Мбайт (тактовая частота — 200 МГц, ADC, PWM, поддержка интерфейсов Ethernet 10/100 MII, CAN, UART, SPI, I2C)

IATF 16949:2016 CERTIFIED COMPANY

**60 ЛЕТ В ИСТОРИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

## K1946BK035

**Малогабаритный** 32-разрядный RISC-микроконтроллер с периферией (тактовая частота — 100 МГц, ADC, PWM, поддержка интерфейсов CAN, UART, SPI, I2C)

## K1946BM014

**Универсальный** 8-разрядный RISC-микроконтроллер с энергонезависимой памятью 8 Кбайт (Тактовая частота — до 16 МГц, ADC, PWM, поддержка интерфейсов UART, SPI, TWI)

# ЗАКАЖИТЕ СЕЙЧАС!

**Дискретные GaN-компоненты: СВЧ GaN-on-SiC транзисторы и усилители мощности с рабочими частотами до 25 ГГц и мощностью до 1 кВт; силовые GaN-on-Si транзисторы с рабочим напряжением до 2000 В и токами до 100 А.**

## Серия мощных СВЧ GaN-транзисторов

**для радиопередающей аппаратуры в L-, S-, C- и X-диапазонах:**

- непрерывного режима, с частотой до 12 ГГц, мощностью от 0,12 до 200 Вт
- импульсные, с частотой до 6 ГГц и мощностью до 400 Вт

## Серия силовых GaN-транзисторов

- Максимально допустимое напряжение сток-исток $U_{СИ}$ от 10 до 450 В
- Максимальный постоянный ток стока $I_C$ от 20 до 40 А
- Сопротивление сток-исток в открытом состоянии $R_{СИ\,ОТК}$ от 50 до 105 мОм

АО «НИИЭТ»
Тел.: +7 (473) 222-91-70
Тел./факс: +7 (473) 280-22-94
www.niiet.ru, niiet@niiet.ru
Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 5

НИИЭТ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

# РОССИЙСКИЕ ИТ-РЕШЕНИЯ ДЛЯ ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА

Baikal ELECTRONICS

ASTRA LINUX®

## Совместимость

Поддержка отечественного ПО на базе Linux

Широкая экосистема совместимых решений

## Универсальность

15 типов интегрированных коммуникационных интерфейсов

Единая платформа для всех типов устройств

## Безопасность

Подходит для систем с повышенными требованиями к безопасности

Настраиваемые уровни защищённости, а также эффективные СЗИ, не имеющие аналогов в мире

**Baikal Electronics**
+7 495 221-39-47
www.baikalelectronics.ru
info@baikalelectronics.ru

**Astra Linux**
+7 495 369-48-16
www.astralinux.ru
info@astralinux.ru

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Software for Modules Based on Microprocessors K1879BM8Я for High-performance Computing
*D. V. Bikonov*
*A. A. Brazhkin*
*A. V. Chernikov*
*L. K. Eysymont*
82 Программное обеспечение модулей на базе микропроцессоров К1879ВМ8Я для высокопроизводительных вычислений
*Д. В. Биконов*
*А. А. Бражкин*
*А. В. Черников*
*Л. К. Эйсымонт*

The Effective Implementation of Complete and Convolutional Layers for Neural Network Calculations Using the NMC4 Kernel and a Floating Point Coprocessor
*A. A. Biryukov*
84 Эффективная реализация полносвязных и сверточных слоев для нейросетевых вычислений на ядре NMC4 с сопроцессором плавающей точки
*А. А. Бирюков*

Preliminary Characteristics of Integrated Circuits Based on IVA TPU IP-core for Accelerated Calculation of Artificial Neural Networks
*P. N. Osipenko*
*I. V. Uvkin*
86 Результаты исследования микросхем на основе СФ-блока ускоренного расчета нейронных сетей IVA TPU
*П. Н. Осипенко*
*И. В. Увкин*

An Algorithm for Parallel Two-step CRC Computation Based on Transformation Matrices
*I. M. Kosarev*
89 Алгоритм параллельного двухступенчатого вычисления CRC на основе матриц преобразования
*И. М. Косарев*

Analysing Promising Approaches for Hardware Support of Cryptographic Algorithms in General-purpose Processors
*P. N. Sovietov*
91 Анализ перспективных подходов к аппаратной поддержке криптографических алгоритмов в процессорах общего назначения
*П. Н. Советов*

Side Channel Analysis. Leakage in the Implementation of the Boolean Mask
*V. V. Blagodatov*
94 Анализ побочных каналов защищенных микроконтроллеров. Утечка информации при реализации маскирования для сети Фейстеля
*В. В. Благодатов*



Свежий номер журнала Вы можете приобрести:

Москва:
В редакции журнала «НАНОИНДУСТРИЯ»
г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2
Санкт-Петербург:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
Невский пр-т, д. 44, 5-й этаж, офис 6,
т. (812) 325-7544, 117-6862, 110-4366,
root@zolshar.spb.ru
Екатеринбург:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
ул. Народной воли, д. 25,
т. (343) 212-1810, 212-1331, ф. (343) 212-2314,
zolshar@online.ural.ru, ekp@front.ru
Новосибирск:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
пр-т К.Маркса, д. 57, офис 708,
т. (3832) 46-2473, ф. (3832) 27-6380, nbzsh@mail.ru
Минск:
Пред-во «Золотой Шар ТМ», пл. Казинца, д. 3,
офис 456, т. (10-375-172) 78-0914,
zolshar@integral.minsk.by
Ижевск:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
ул. Софьи Ковалевской, д. 4а, офис 4,
т. (3412) 42-5241, т./ф. (3412) 42-5472,
office@zolshar.izhnet.ru

Подписка

- по каталогу «Газеты и журналы» агентства «Роспечать», индексы
  80939 – полугодовой индекс
  48508 – годовой индекс
- АО «МК-Периодика»
- ГК «Урал-Пресс»
- ООО «Информнаука» – зарубежная подписка
- в редакции журнала
  по тел.: +7 (495) 234-0110
  e-mail: magazine@technosphera.ru

Подписаться на электронную версию на сайтах:
www.nanoindustry.su, elibrary.ru, www.e.lanbook.ru

Foreign subscriptions are accepted

- by the Agency "Mezhdunarodnaya Kniga".
  Phone: (007 495) 238-4967, Fax: (007 495) 238–4634
  or by companies cooperating with Mezhkniga
- by the "Rospechat" agency catalogue "Russian Newspapers & Magazines – 2005",
  Phone: (007 495) 195-6677, 195-6418,
  Fax: (007 495) 195-1431, 785-1470,
  E-mail: ovs@rosp.ru, http://www.rosp.ru

Наши представители в Германии

REC Russland Experten Consulting GmbH
Olgastrase 82 89073 Ulm
T +(49) 731 145 344 94
M +(49) 151 156 820 18
n.wenzel@russland-experten.com
www.russland-experten.com

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


The Problem of Unification of Modules Based on the Elbrus-2C3 Processor
*P. A. Chuchko*
*I. N. Bychkov*
*E. G. Panchenko*
96 Проблема унификации модулей на основе процессора «Эльбрус-2С3»
*П. А. Чучко*
*И. Н. Бычков*
*Е. Г. Панченко*

**Data Management and Radio Engineering Systems**
**98 Информационно-управляющие и радиотехнические системы**

ADAS Platform Produced by "ICC Milandr" JSC
*Y. O. Myakochin*
98 Система помощи водителю (ADAS) от компании АО «ПКК Миландр»
*Ю. О. Мякочин*

Automation of the Process of Collecting and Processing Information for Integrated Circuits Quality Control
*E. S. Yanakova*
*A. A. Shvachko*
*A. M. Belov*
100 Автоматизация процесса сбора и обработки информации для функционального контроля интегральных микросхем
*Е. С. Янакова*
*А. А. Швачко*
*А. М. Белов*

Viterbi Algorithm HW-SW Implementation Using Elcore-30MV DSP Core
*Y. N. Alexandrov*
*A. A. Belyaev*
*D. A. Kuznetsov*
*Y. Y. Petrichkovich*
*T. V. Solokhina*
*A. S. Kuchinsky*
*A. A. Frolov*
102 Аппаратно-программная реализация алгоритма Витерби на базе DSP-ядра Elcore-30MV
*Ю. Н. Александров*
*А. А. Беляев*
*Д. А. Кузнецов*
*Я. Я. Петричкович*
*Т. В. Солохина*
*А. С. Кучинский*
*А. А. Фролов*

Scheme for Automatic Correction of Signal Asymmetry in the Lines of a Multiplex Data Bus
*P. M. Eremeev*
*Y. V. Molodykh*
105 Схема автоматической коррекции асимметрии сигнала в линиях мультиплексного канала обмена
*П. М. Еремеев*
*Ю. В. Молодых*

Constructive and Technological Solutions to Create the Universal Modular Drive Control Platform with Various Types of Electric Motors and Mobile Mechanisms
*O. R. Shaymardanova*
*V. M. Vorob'yev*
107 Конструктивные и технологические решения создания универсальной модульной платформы управления приводами, различными типами электрических двигателей, подвижными механизмами
*О. Р. Шаймарданова*
*В. М. Воробьев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Information and Control System to Cure Patients with Impaired Larynx Function
*D. V. Telyshev*
*I. V. Nesterenko*
*A. A. Bochkov*
*K. A. Mamekin*
109 Информационно-управляющая система для лечения пациентов с нарушениями функции гортани
*Д. В. Телышев*
*И. В. Нестеренко*
*А. А. Бочков*
*К. А. Мамекин*

Design Methods of the Electronic Implants Wireless Power Supply Systems
*A. A. Danilov*
111 Методы проектирования систем беспроводного питания электронных имплантатов
*А. А. Данилов*

Layout Development of a Wireless Energy Transmission System to an Implantable Miniature Blood Pump
*E. A. Mindubayev*
113 Разработка макета системы беспроводной передачи энергии к имплантируемому миниатюрному роторному насосу крови
*Э. А. Миндубаев*

IPs for Designing of SoC in the Field of Information Control and Radio Engineering Systems
*D. S. Shipitsin*
*A. A. Butov*
*B. A. Shokarev*
115 Сложно-функциональные блоки для проектирования СнК в области информационно-управляющих и радиотехнических систем
*Д. С. Шипицин*
*А. А. Бутов*
*Б. А. Шокарев*

On the Issue of Creating an Intelligent Decentralized Energy Storage System
*M. Y. Lustgarten*
*M. I. Sobchenko*
*V. I. Ukhandeev*
117 К вопросу создания интеллектуальной децентрализованной энергонакопительной системы
*М. Ю. Лустгартен*
*М. И. Собченко*
*В. И. Ухандеев*

Diagnostics of Serviceability of Remote Objects Movement Meters with Built-in Control Devices
*D. A. Medeev*
119 Диагностика исправности дистанционных измерителей параметров движения объектов устройствами встроенного контроля
*Д. А. Медеев*

Side Radar Information Control Systems: Modern State and Development Trends
*V. N. Antipov*
*Ye. Ye. Koltyshev*
*N. B. Medunitsin*
*D. Yu. Suslyakov*
*A. Yu. Frolov*
*V. T. Yankovskiy*
122 Бортовые радиолокационные информационно-управляющие системы: современное состояние и направления развития
*В. Н. Антипов*
*Е. Е. Колтышев*
*Н. Б. Медуницин*
*Д. Ю. Сусляков*
*А. Ю. Фролов*
*В. Т. Янковский*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Application of Radio Photonics Technologies while Creating Space-based Synthetic-aperture Radars
*V. O. Los*
124 Применение технологий радиофотоники при создании локаторов космического базирования с синтезированной апертурой
*В. О. Лось*

Remote Sensing Radar's Small Spacecraft Constellation and Requirements to Onboard Radar Equipment
*V. K. Tsvetkov*
*K. S. Lyalin*
*A. L. Pereverzev*
*V. I. Oreshkin*
*V. A. Kozlov*
126 Построение группировки малых космических аппаратов радиолокационного зондирования Земли и синтез требований к бортовой радиолокационной аппаратуре
*В. К. Цветков*
*К. С. Лялин*
*А. Л. Переверзев*
*В. И. Орешкин*
*В. А. Козлов*

Developing MIMO Radar Based on PSK Signals
*A. L. Pereverzev*
*K. S. Lyalin*
*Y. M. Meleshin*
*V. N. Karpov*
*R. N. Kolesnikov*
129 Разработка MIMO-радара на базе ФКМ-сигналов
*А. Л. Переверзев*
*К. С. Лялин*
*Ю. М. Мелёшин*
*В. Н. Карпов*
*Р. Н. Колесников*

Model-oriented Design of Radio-engineering Systems
*M. O. Uss*
132 Модельно-ориентированное проектирование радиотехнических систем
*М. О. Усс*

Algorithm for High-precision Assessment of the Current Parameters of Reliability in the Radar During Operation in Heat-stressed Modes
*A. V. Timoshenko*
*D. V. Kaleev*
*A. Yu. Perlov*
*A. V. Ermakov*
134 Алгоритм высокоточной оценки текущих параметров надежности РЛК при работе в теплонапряженных режимах
*А. В. Тимошенко*
*Д. В. Калеев*
*А. Ю. Перлов*
*А. В. Ермаков*

Developing a Small-sized Bipolarized Doppler Meteorological Near-field Radar
*Y. S. Tsyplenkov*
*A. A. Anurin*
137 Разработка малогабаритного двухполяризационного доплеровского метеорологического радиолокатора ближней зоны
*Ю. С. Цыпленков*
*А. А. Анурин*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Autofocusing the Radar Image of Synthetic Aperture Radars in the Absence of Navigation System Data
*A. L. Pereverzev, K. S. Lyalin, V. A. Kozlov, I. A. Kuzmin, M. S. Khasanov*
142 Автофокусировка радиолокационного изображения радиолокаторов с синтезированной апертурой в условиях отсутствия данных навигационных систем
*А. Л. Переверзев, К. С. Лялин, В. А. Козлов, И. А. Кузьмин, М. С. Хасанов*

Link Budget Estimation for Downlink Satellite Communication System for NB-IoT Technologies
*V. Y. Mikhailov, E. Y. Kotlyarov, A. V. Nuykin*
146 Оценка бюджета нисходящего канала спутниковой системы связи для технологии NB-IoT
*В. Ю. Михайлов, Е. Ю. Котляров, А. В. Нуйкин*

Compact Modular Multi-band Radar Remote Sensing Platform for UAV
*K. S. Lyalin, A. L. Pereverzev, I. A. Kuzmin, A. Y. Sheremet, T. A. Dovgal*
150 Малогабаритная модульная платформа многодиапазонного радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли для БПЛА
*К. С. Лялин, А. Л. Переверзев, И. А. Кузьмин, А. Ю. Шеремет, Т. А. Довгаль*

To Ensure Management Quality Improvement is the Key Factor for Solving the Task of Microelectronics Development Rate Acceleration
*N. S. Medvekhkv*
153 Обеспечение повышения качества управления — ключевой фактор решения задачи ускорения темпа развития микроэлектроники
*Н. С. Медвехкв*

Radar Environment Simulator for Digital Signal Processing Devices of Short-Range Radar Systems
*M. A. Anisimova, A. M. Silantiev, A. L. Pereverzev*
155 Имитатор радиолокационной обстановки для устройств цифровой обработки сигналов систем ближней радиолокации
*М. А. Анисимова, А. М. Силантьев, А. Л. Переверзев*

Open-source Digital Design/System on Chip Verification Acceleration Platform
*A. L. Pereverzev, A. M. Silantiev, A. P. Solodovnikov*
157 Открытая платформа ускорения верификации цифровой аппаратуры и систем на кристалле
*А. Л. Переверзев, А. М. Силантьев, А. П. Солодовников*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Problems of Developing a Universal Modular Electric Drive Control Platform
*M. M. Vorobev*
*K. S. Lialin*
*A. A. Menshov*
*D. A. Suvorov*
*R. E. Filimonov*
*A. N. Yakunin*
160 Проблемы разработки универсальной модульной платформы управления электроприводами
*М. М. Воробьёв*
*К. С. Лялин*
*А. А. Меньшов*
*Д. А. Суворов*
*Р. Э. Филимонов*
*А. Н. Якунин*

Software Structure and Operation Algorithm of the Electric Motor Control Platform
*M. M. Vorobev*
*K. S. Lialin*
*D. A. Suvorov*
*R. E. Filimonov*
163 Структура программного обеспечения и алгоритм работы платформы управления электродвигателями
*М. М. Воробьёв*
*К. С. Лялин*
*Д. А. Суворов*
*Р. Э. Филимонов*

Automated Workplace of Information and Control Systems Manufacturer
*A. N. Yakunin*
*V. A. Kosenko*
*V. A. Ivanov*
167 Автоматизированное рабочее место производителя информационно-управляющих систем
*А. Н. Якунин*
*В. А. Косенко*
*В. А. Иванов*

Setting and Adjusting the E-class Power Amplifier in the Wireless Power Transmission System
*K. O. Gurov*
*E. A. Mindubayev*
170 Настройка и регулировка усилителя мощности класса Е в системе беспроводной передачи энергии
*К. О. Гуров*
*Э. А. Миндубаев*

Power Characteristics of the Adaptive System of Inductive Energy Transmission with an E Class Power Amplifier
*Ye. V. Selyutina*
*E. A. Mindubayev*
172 Мощностные характеристики адаптивной системы индуктивной передачи энергии с усилителем мощности класса Е
*Е. В. Селютина*
*Э. А. Миндубаев*

Determinating Maximum Permittable Operation Frequency for Inductive Transcutaneous Energy Transfer System with 10 W Output Power
*E. V. Ryabchenko*
*E. S. Dyachkova*
*A. A. Danilov*
174 Определение предельного значения рабочей частоты системы чрескожной индуктивной передачи энергии мощностью 10 Вт
*Е. В. Рябченко*
*Е. С. Дьячкова*
*А. А. Данилов*

Developing a Coil Pair for a 10 W Percutaneous Inductive Power Transmission System
*R. R. Aubakirov*
*I. V. Yudakov*
*A. A. Danilov*
176 Разработка катушечной пары для системы чрескожной индуктивной передачи энергии мощностью 10 Вт
*Р. Р. Аубакиров*
*И. В. Юдаков*
*А. А. Данилов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


**Techologies and Micro- and Nanoelectronics Components** 178 **Технологии и компоненты микро- и наноэлектроники**

Problems of Quality Management of Basic Microelectronic Technologies Used in the Design and Manufacture of VLSI
*V. N. Panasyuk*
*A. N. Koroleva*
*P. V. Ignatov*
*D. S. Shipitsin*
178 Проблемы управления качеством базовых технологий микроэлектроники, используемых при проектировании и производстве СБИС
*В. Н. Панасюк*
*А. Н. Королева*
*П. В. Игнатов*
*Д. С. Шипицин*

Developing SONOS Radiation-resistant Non-volatile Memory Based on 180 nm Technology
*D. V. Chervonnyy*
*R. A. Arilin*
*D. I. Bolychev*
180 Разработка технологии и конфигурации радиационно стойкой ячейки энергонезависимой памяти SONOS на базе технологии КМОП 180 нм
*Д. В. Червонный*
*Р. А. Арилин*
*Д. И. Болычев*

Optimization of Memory Properties from the Composition of $SiO_x$-based Memristor Obtained by Plasma-chemical Deposition
*A. A. Gismatulin*
*V. A. Gritsenko*
*G. N. Kamaev*
182 Оптимизация запоминающих свойств от состава мемристора на основе $SiO_x$, полученного плазмохимическим осаждением
*А. А. Гисматулин*
*В. А. Гриценко*
*Г. Н. Камаев*

ScientaOmicron Instruments and Technologies Used to Create the Nano-scale Structures with Specified Physical Properties and Developing a Quantum Computer Prototype
*A. A. Shaforostov*
*M. A. Trusov*
185 Приборы и технологии ScientaOmicron для создания наномасштабных структур с заданными физическими свойствами и построения прототипа квантового компьютера
*А. А. Шафоростов*
*М. А. Трусов*

Some Features of a Transition to 28 nm Node Photolithography
*D. S. Shipitsyn*
*A. L. Pankratov*
*N. N. Balan*
*V. V. Ivanov*
*A. V. Kuzovkov*
187 Особенности перехода к фотолитографии уровня 28 нм
*Д. С. Шипицин*
*А. Л. Панкратов*
*Н. Н. Балан*
*В. В. Иванов*
*А. В. Кузовков*

Design and Technological Features of Creating a Mixed-signal Circuits with Design Standards of 28 nm
*N. M. Gorshkova*
190 Конструктивно-технологические особенности проектирования аналого-цифровых схем с проектными нормами 28 нм
*Н. М. Горшкова*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Assessing Sub-100 nm CMOS ICs Reliability Using Accelerated Measurement Test Structure
*A. S. Sivchenko*
192
Оценка надежности суб-100-нм КМОП ИС с использованием ускоренных испытаний тестовых структур
*А. С. Сивченко*

III-N Heterostructures for Microwave and Power Electronics Grown on the Domestic Dragon-125 MOCVD System
*A. F. Tsatsulnikov*
*W. V. Lundin*
*E. E. Zavarin*
*A. V. Sakharov*
*A. E. Nikolaev*
195
III-N-гетероструктуры для СВЧ- и силовой электроники, выращенные на отечественной установке МОС-гидридной эпитаксии Dragon-125
*А. Ф. Цацульников*
*В. В. Лундин*
*Е. Е. Заварин*
*А. В. Сахаров*
*А. Е. Николаев*

Using 6-inch Ultrahigh-resistance Epitaxial Structures of Silicon for Ga(Al)N Compounds Growth by MOCVD Method
*S. D. Fedotov*
*W. V. Lundin*
*E. E. Zavarin*
*A. V. Sakharov*
*A. F. Tsatsulnikov*
*E. M. Sokolov*
*V. N. Statsenko*
*V. I. Egorkin*
*V. E. Zemlyakov*
*A. A. Zaitsev*
*O. B. Chukanova*
197
Использование сверхвысокоомных эпитаксиальных структур кремния диаметром до 150 мм для роста Ga(Al)N-соединений методом МОГФЭ
*С. Д. Федотов*
*В. В. Лундин*
*Е. Е. Заварин*
*А. В. Сахаров*
*А. Ф. Цацульников*
*Е. М. Соколов*
*В. Н. Стаценко*
*В. И. Егоркин*
*В. Е. Земляков*
*А. А. Зайцев*
*О. Б. Чуканова*

SiC — the Future of Power Semiconductor Devices
*V. V. Kalashnikov*
201
SiC — будущее силовых полупроводниковых приборов
*В. В. Калашников*

How to Increase the Efficiency of Power Modules and Reduce Their Weight and Dimensions? Modern Materials and Die Bonding Using Sintering Technology for Production of Elements and Modules for Power Electronics
*V. I. Ivanov*
203
Как повысить КПД силовых модулей и снизить их массогабаритные показатели? Современные материалы и монтаж кристаллов по технологии «спекание» для производства элементов и модулей силовой электроники
*В. И. Иванов*

Controlling Silicon Wafer Bow in the Technology of Chloride Vapor Transport
*Yu. N. Baranov*
*D. V. Tarasov*
*S. D. Fedotov*
*E. M. Sokolov*
*V. N. Statsenko*
*S. A. Gavrilov*
206
Управление прогибом структур кремния в технологии хлоридных газотранспортных реакций
*Ю. Н. Баранов*
*Д. В. Тарасов*
*С. Д. Федотов*
*Е. М. Соколов*
*В. Н. Стаценко*
*С. А. Гаврилов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Modular Test Platform RXI is the Universal Architecture with Infinity Opportunities
*Ye. A. Bocharova*
209 Модульная тестовая платформа RXI — универсальная архитектура с безграничными возможностями
*Е. А. Бочарова*

Optimizing Electrochemical Deposition Processes
*D. A. Sukhanov*
211 Оптимизация процессов электрохимического осаждения
*Д. А. Суханов*

High-ohmic GaAs-AlGaAs Structures for Power Electronics
*V. L. Kryukov*
*E. V. Kryukov*
*A. V. Levi*
214 Высокоомные структуры GaAs-AlGaAs для силовой электроники
*В. Л. Крюков*
*Е. В. Крюков*
*А. В. Леви*

GaAs-AlGaAs Heterostructures for Personalized Medicine Devices
*V. L. Kryukov*
*E. V. Kryukov*
*A. S. Vasilchikov*
217 Гетероструктуры GaAs-AlGaAs для приборов персонализированной медицины
*В. Л. Крюков*
*Е. В. Крюков*
*А. С. Васильчиков*

Developing Domestic Electronic Components of Power Electronics Based on Heteroepitaxial Structures of Gallium Nitride
*E. V. Erofeev*
*E. S. Polyntsev*
220 Разработка отечественной электронной компонентной базы силовой электроники на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия
*Е. В. Ерофеев*
*Е. С. Полынцев*

Applying Numerical Modeling for Studying the Effect of the Accumulated Dose of Ionizing Radiation on the Degradation of the Parameters of an n-Channel Transistor with a 0.18 μm Technology Node
*D. A. Lagaev*
*A. S. Klyuchnikov*
*N. A. Shelepin*
*A. V. Seletskiy*
223 Применение численного моделирования при учете влияния накопленной дозы ионизирующего излучения на деградацию параметров n-канального транзистора с проектной нормой 0,18 мкм
*Д. А. Лагаев*
*А. С. Ключников*
*Н. А. Шелепин*
*А. В. Селецкий*

Contributing Factors for the Tunnel Silicon Oxide Critical Dimensions in EEPROM Technology
*I. V. Kiryushina*
225 Факторы, влияющие на линейные размеры туннельного оксида кремния в технологии EEPROM
*И. В. Кирюшина*

Using Methods for Statistical Prediction of Circuit Parameters Degradation to Assess Reliability Indicators
*A. V. Solovev*
*A. V. Seletskiy*
227 Использование методов статистического прогнозирования деградации параметров схемы для оценки показателей надежности
*А. В. Соловьев*
*А. В. Селецкий*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Multilayer Energy Reaction Ni/Al Reaction Nanofoil for Connecting Heat Sensitive Electronic Components
*I. A. Korzh*
*V. A. Chuklin*
229
Многослойная энергетическая реакционная нанофольга Ni/Al для соединения термочувствительных электронных компонентов
*И. А. Корж*
*В. А. Чуклин*

Recognition of Material Properties During Die Attachment as an Important Factor in the Efficiency of Heat Dissipation from a Microassembly
*V. N. Kadyrov*
232
Учет свойств материалов при монтаже кристалла как важный фактор эффективности отведения тепла от микросборки
*В. Н. Кадыров*

Laser-formed Electrical Conductive Networks Based on Carbon Nanotubes and Graphene Oxide
*A. V. Kuksin*
*A. Yu. Gerasimenko*
235
Электропроводящие сети на основе углеродных нанотрубок и оксида графена, сформированные лазером
*А. В. Куксин*
*А. Ю. Герасименко*

To the Question of the Neutron Irradiation Effect on the Characteristics of High-power High-frequency GaAs p-i-n Diodes
*F. Y. Soldatenkov*
*V. A. Kozlov*
*M. M. Sobolev*
238
К вопросу о влиянии нейтронного облучения на характеристики мощных высокочастотных p-i-n-диодов на основе GaAs
*Ф. Ю. Солдатенков*
*В. А. Козлов*
*М. М. Соболев*

Equipment for Semiconductor Chip Assembly via Process of Low Temperature Silver Nanoparticle Sintering
*V. A. Kozlov*
*S. A. Kalashnikov*
*V. E. Gladyshev*
240
Оборудование для сборки чипов полупроводниковых приборов методом низкотемпературного спекания наночастиц серебра
*В. А. Козлов*
*С. А. Калашников*
*В. Э. Гладышев*

The Drift Velocity of Electrons in AlGaAs/InGaAs/GaAs Heterostructures with Donor-acceptor Doping and Superlattice Spacers
*D. Yu. Protasov*
*A. K. Bakarov*
*K. S. Zhuravlev*
242
Дрейфовая скорость электронов в гетероструктурах AlGaAs / InGaAs / GaAs донорно-акцепторным легированием и сверхрешеточными спейсерами
*Д. Ю. Протасов*
*А. К. Бакаров*
*К. С. Журавлев*

Topological Features of FPGA Elements Transistor Redundancy
*M. S. Nikitin*
*S. F. Tyurin*
245
Топологические особенности транзисторного резервирования элементов ПЛИС
*М. С. Никитин*
*С. Ф. Тюрин*

The Role of the Surface in Micro- and Nanoelectronics Technology
*V. P. Bokarev*
*G. Ya. Krasnikov*
247
Роль поверхности в технологии микро- и наноэлектроники
*В. П. Бокарев*
*Г. Я. Красников*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


**Micro- and Optoelectronics for General and Dedicated Purposes** 250 **Изделия микро- и оптоэлектроники общего и специального назначения**

3D SIP Technology-prospects for Creating Space Electronic Devices
*A. Y. Novoselov*
250 Перспективы развития технологии 3D-микросборок для аппаратуры космического применения
*А. Ю. Новоселов*

Opportunities and Prospects for Contract Development and Production on the Russian Semiconductor Factory of the Competitive ECB Silicon SHF-electronics for Communication Systems, Radar, Radio Frequency Identification, and Navigation
*D. I. Sotskov*
*L. I. Babak*
*P. V. Panasenko*
*V. V. Yelesin*
*N. A. Usachev*
*A. G. Kuznetsov*
*V. N. Kotov*
*A. V. Seletskiy*
*N. A. Shelepin*
253 Возможности и перспективы контрактной разработки и производства на российской полупроводниковой фабрике конкурентоспособной ЭКБ кремниевой СВЧ электроники для систем связи, радиолокации, радиочастотной идентификации, навигации
*Д. И. Сотсков*
*Л. И. Бабак*
*П. В. Панасенко*
*В. В. Елесин*
*Н. А. Усачев*
*А. Г. Кузнецов*
*В. Н. Котов*
*А. В. Селецкий*
*Н. А. Шелепин*

Research on the Influence of $SiN_x$ Film Deposition Regimes on the Properties of 2DEG in AlGaN/GaN Heterostructures
*I. A. Zhilnikov*
*S. V. Minnebaev*
*L. A. Seidman*
*A. V. Chernykh*
256 Исследование влияния режимов нанесения диэлектрических пленок $SiN_x$ на свойства ДЭГ гетероструктур AlGaN/GaN
*И. А. Жильников*
*С. В. Миннебаев*
*Л. А. Сейдман*
*А. В. Черных*

On-chip NOR Flash Memory Controller with Parallel Access
*A. G. Vorsin*
*E. V. Ivasiuk*
259 Контроллер накристальной NOR флеш-памяти с параллельным доступом
*А. Г. Ворсин*
*Е. В. Ивасюк*

Developing Set of Galvanic Isolated Transceivers
*Y. V. Agrich*
*A. B. Makarov*
*Y. M. Pavlyuk*
*E. V. Suchoterin*
*A. V. Tuchin*
261 Разработка серии микросборок приемо-передатчиков с гальванической развязкой
*Ю. В. Агрич*
*А. Б. Макаров*
*Ю. М. Павлюк*
*Е. В. Сухотерин*
*А. В. Тучин*

A Series of 16, 32 and 64 Mbit Static Memory Integrated Circuits of Domestic Production
*S. A. Ivanov*
*S. M. Ignatev*
*V. D. Meshchanov*
*E. S. Rybalko*
*N. A. Shelepin*
263 Серия микросхем статической памяти 16, 32 и 64 Мбит отечественного производства
*С. А. Иванов*
*С. М. Игнатьев*
*В. Д. Мещанов*
*Е. С. Рыбалко*
*Н. А. Шелепин*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Designing SONOS Non-volatile Programmable Memory IC for Special Purpose Application
*I. V. Ermakov*
*I. A. Zubov*
*A. V. Nuykin*
*V. A. Alferov*
269 Разработка специализированной микросхемы энергонезависимой перепрограммируемой памяти SONOS
*И. В. Ермаков*
*И. А. Зубов*
*А. В. Нуйкин*
*В. А. Алферов*

Perspective Samples of Quartz and SHF-generators for the Responsible Applications
*A. O. Lozhnikov*
271 Перспективные образцы кварцевых и СВЧ-генераторов для ответственных применений
*А. О. Ложников*

Analysis of the Delta Design Platform Features to Design the Integrated Circuits
*S. V. Rybkin*
273 Анализ возможностей платформы Delta Design для проектирования интегральных микросхем
*С. В. Рыбкин*

Overview of the Cross-cutting Specialized Route to Design the Highly Cute Systems in a Case Based on Siemens EDA Solutions (ex. Mentor Graphics)
*A. A. Filippov*
275 Обзор сквозного специализированного маршрута проектирования высокоплотных систем в корпусе на базе решений Siemens EDA (ex. Mentor Graphics)
*А. А. Филиппов*

UVM and Emulation: Peculiarities of Modern Path Functional Verification of Digital Systems
*M. A. Korobkov*
278 UVM и эмуляция: черты современного маршрута функциональной верификации цифровых систем
*М. А. Коробков*

Digital Models in the Electronics Industry: Basic Elements of Technological Libraries, Complex-functional Blocks, and ECB Products
*V. V. Yelesin*
*D. I. Sotskov*
*N. M. Zhidkov*
*I. A. Danilov*
*A. G. Kuznetsov*
*N. A. Usachev*
281 Цифровые модели в электронной промышленности: базовые элементы технологических библиотек, сложно-функциональные блоки, изделия ЭКБ
*В. В. Елесин*
*Д. И. Сотсков*
*Н. М. Жидков*
*И. А. Данилов*
*А. Г. Кузнецов*
*Н. А. Усачев*

Elements of Fast Multiplication Based on Galois Algebra and Noise-resistant Coding in Residual Classes for Parallel and Stream Computing
*A. A. Antonov*
*A. G. Prozorova*
*A. A. Krasnyuk*
283 Элементы быстрого умножения на основе алгебры Галуа и помехоустойчивого кодирования в остаточных классах для параллельных и поточных вычислений
*А. А. Антонов*
*А. Г. Прозорова*
*А. А. Краснюк*

Difficulties in TCAD Modeling of FinFET Structures Considering Radiation Effects
*K. O. Petrosyants*
*D. S. Silkin*
*D. A. Popov*
286 Проблемы TCAD-моделирования FinFET-структур с учетом радиационных эффектов
*К. О. Петросянц*
*Д. С. Силкин*
*Д. А. Попов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Influence of Aging Effects on the Electrical Characteristics of Integrated CMOS Op Amps with Reducing the Minimum Size of Transistors
*I. A. Kharitonov*
*A. S. Belopashentsev*
289 Влияние эффектов старения на электрические характеристики интегральных КМОП ОУ при уменьшении минимальных размеров транзисторов
*И. А. Харитонов*
*А. С. Белопашенцев*

Radiation-oriented Characterization of the SiGe Technological Process SIGE BiCMOS 0.42 mkm by Thyristor Effect
*A. G. Kuznetsov*
*V. V. Yelesina*
*N. A. Usachev*
*V. V. Yelesin*
*A. S. Budyakov*
*Ye. M. Savchenko*
*D. I. Garanovich*
291 Радиационно-ориентированная характеризация технологического процесса SiGe БиКМОП 0,42 мкм по тиристорному эффекту
*А. Г. Кузнецов*
*В. В. Елесина*
*Н. А. Усачев*
*В. В. Елесин*
*А. С. Будяков*
*Е. М. Савченко*
*Д. И. Гаранович*

Comparative Analysis of Approaches to Control the Radiation Resistance of the ECB During the OCP and Serial Production
*Yu. M. Moskovskaya*
293 Сравнительный анализ подходов к контролю радиационной стойкости ЭКБ в ходе ОКР и серийного производства
*Ю. М. Московская*

What is Needed by the Developer of Space Equipment to Counteract a Single Thyristor Effect?
*A. V. Yanenko*
*A. A. Pechenkin*
*D. V. Savchenkov*
297 Что нужно разработчику космической аппаратуры для противодействия одиночному тиристорному эффекту
*А. В. Яненко*
*А. А. Печенкин*
*Д. В. Савченков*

Modeling Extreme Events at Heavy Ion Interaction with Modern Intergrated Circuit Material
*A. M. Galimov*
*D. I. Korochenko*
*A. I. Gukov*
*I. A. Fateev*
300 Физическое моделирование экстремальных событий при взаимодействии одиночных заряженных частиц с материалом современных интегральных микросхем
*А. М. Галимов*
*Д. И. Короченко*
*А. И. Гуков*
*И. А. Фатеев*

Practical Aspects of the ADC Microchips Testing on Resistance to the TZCh Effects
*R. C. Torshin*
*G. S. Sorokoumov*
*D. V. Bobrovskiy*
*M. O. Kalashnikova*
301 Практические аспекты проведения испытаний микросхем АЦП на стойкость к воздействию ТЗЧ
*Р. С. Торшин*
*Г. С. Сорокоумов*
*Д. В. Бобровский*
*М. О. Калашникова*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


The Concept of Ensuring the Radiation Tolerance of CMOS SOI Technological Processes
*A. V. Seletskiy*
*N. A. Shelepin*
*V. D. Meshchanov*
*A. V. Ulanova*
304 Концепция обеспечения радиационной стойкости КМОП КНИ технологических процессов
*А. В. Селецкий*
*Н. А. Шелепин*
*В. Д. Мещанов*
*А. В. Уланова*

Investigation of the Sensitive Field of KRS MOS-Transistor to the Effects of Secondary Particles Arising from Neutron Irradiation
*M. G. Chistyakov*
*A. A. Glushko*
*S. A. Morozov*
307 Исследование чувствительной области КНИ МОП-транзистора к воздействию вторичных частиц, возникающих вследствие облучения нейтронами
*М. Г. Чистяков*
*А. А. Глушко*
*С. А. Морозов*

TID Engineering Test Methods for ELDRS
*D. V. Boychenko*
*A. O. Akhmetov*
*O. A. Kalashnikov*
*I. O. Loskutov*
*A. Y. Nikiforov*
311 Инженерные методы учета низкой интенсивности космического пространства
*Д. В. Бойченко*
*А. О. Ахметов*
*О. А. Калашников*
*И. О. Лоскутов*
*А. Ю. Никифоров*

A Family of Color and Monochrome Active-Matrix OLED Microdisplays
*D. O. Darvin*
*A. Yu. Zababurin*
*S. A. Ilin*
*T. Yu. Ilushkin*
*O. V. Lastochkin*
*A. V. Nuriev*
*S. A. Staharnyi*
*A. I. Titov*
*D. S. Shipitsin*
314 Семейство полноцветных и монохромных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов
*Д. О. Дарвин*
*А. Ю. Забабурин*
*С. А. Ильин*
*Т. Ю. Илюшкин*
*О. В. Ласточкин*
*А. В. Нуриев*
*С. А. Стахарный*
*А. И. Титов*
*Д. С. Шипицин*

Powerful Semiconductor Lasers for Radio Photonics
*S. O. Slipchenko*
*A. A. Podoskin*
*D. A. Veselov*
*N. A. Pikhtin*
*P. S. Kop'yev*
317 Мощные полупроводниковые лазеры для задач радиофотоники
*С. О. Слипченко*
*А. А. Подоскин*
*Д. А. Веселов*
*Н. А. Пихтин*
*П. С. Копьев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Single-frequency Semiconductor Lasers for Radiophotonic Paths with the External Modulation Emitting at the Wavelength of 1,55 μm
*O. O. Bagayeva, A. I. Danilov, A. V. Ivanov, V. D. Kurnosov, K. V. Kurnosov, Yu. V. Kurnyavko, M. A. Ladugin, A. A. Marmalyuk, V. I. Romantsevich, Yu. L. Ryaboshtan, V. A. Simakov, V. N. Svetogorov, R. V. Chernov, V. V. Shishkov*
319 Одночастотные полупроводниковые лазеры для радиофотонных трактов с внешней модуляцией, излучающие на длине волны 1,55 мкм
*О. О. Багаева, А. И. Данилов, А. В. Иванов, В. Д. Курносов, К. В. Курносов, Ю. В. Курнявко, М. А. Ладугин, А. А. Мармалюк, В. И. Романцевич, Ю. Л. Рябоштан, В. А. Симаков, В. Н. Светогоров, Р. В. Чернов, В. В. Шишков*

Comparison of the Resistance Levels of the Visible Range Semiconductor and Organic LEDs to the Effects of Absorbed Dose and Structural Damage
*R. K. Mozhayev, A. A. Pechenkin, D. S. Ukolov*
321 Сравнение уровней стойкости полупроводниковых и органических светодиодов видимого диапазона к эффектам поглощенной дозы и структурным повреждениям
*Р. К. Можаев, А. А. Печенкин, Д. С. Уколов*

Studying the Structural Damage Formation Effect in the CMOS Matrix with Protons Low-intensity Irradiation of Various Energies
*V. P. Lukashin, A. V. Yanenko, A. A. Pryanichnikov, A. V. Ulanova, A. Yu. Nikiforov*
324 Исследование эффекта образования структурных повреждений в КМОП-матрице при низкоинтенсивном облучении протонами различных энергий
*В. П. Лукашин, А. В. Яненко, А. А. Пряничников, А. В. Уланова, А. Ю. Никифоров*

Scientific and Technical Aspects of Solid Power Amplifiers Tests with Operating Frequencies up to 40GHz
*K. M. Amburkin, A. G. Kuznetsov, I. M. Sheremeta*
328 Научно-технические аспекты испытаний твердотельных усилителей мощности с рабочими частотами до 40 ГГц
*К. М. Амбуркин, А. Г. Кузнецов, И. М. Шеремета*

Main Features of Testing Microcircuits for Pulsed Electric Strength
*A. A. Anikin, K. A. Yepifantsev, P. K. Skorobogatov*
330 Основные особенности испытаний микросхем на импульсную электрическую прочность
*А. А. Аникин, К. А. Епифанцев, П. К. Скоробогатов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Features of Design and Installation of Deionized Water Distribution Systems in Water Treatment Plants for the Electronic Industry
*D. A. Safonova*
332
Особенности проектирования и монтажа систем распределения деионизованной воды в станциях водоподготовки для предприятий электронной отрасли
*Д. А. Сафонова*

Approach to Raising the Confidence Level to Hardware and Software Platforms of the Critical Infrastructures Information Systems in Order to Prevent Computer Attacks Using Vulnerabilities in BIOS Software
*A. Yu. Borovikov*
*O. A. Maslov*
*S. Ye. Kuznetsov*
*I. A. Kozlov*
338
Подход к повышению уровня доверия к аппаратно-программным платформам информационных систем критически важных инфраструктур в целях предупреждения компьютерных атак с использованием уязвимостей в ПО BIOS
*А. Ю. Боровиков*
*О. А. Маслов*
*С. Е. Кузнецов*
*И. А. Козлов*

Integrated Circuits. The Problem of Trust
*B. F. Bezrodnyi*
*A. V. Bespalov*
*D. O. Smirnov*
340
Интегральные микросхемы. Проблема доверенности
*Б. Ф. Безродный*
*А. В. Беспалов*
*Д. О. Смирнов*

GaAs-SnAs-Sn Heterojunction
*S. Belousov*
*M. A. Bobylev*
*V. I. Kovalev*
*Ye. V. Kayevitser*
*V. Ye. Lyubchenko*
343
Гетеропереход GaAs-SnAs-Sn
*С. Белоусов*
*М. А. Бобылев*
*В. И. Ковалев*
*Е. В. Каевицер*
*В. Е. Любченко*

Research and Development of a MEMS-accelerometer
*E. S. Kochurina*
*S. A. Anchutin*
*A. S. Musatkin*
*I. S. Dernov*
*A. S. Timoshenkov*
*V. M. Polushkin*
*S. P. Timoshenkov*
345
Разработка и исследование МЭМС-акселерометра
*Е. С. Кочурина*
*С. А. Анчутин*
*А. С. Мусаткин*
*И. С. Дернов*
*А. С. Тимошенков*
*В. М. Полушкин*
*С. П. Тимошенков*

Installation for Measuring the Current Collapse of the GAN Transistors in Pulse Mode
*I. M. Abolduyev*
*N. V. Alkeyev*
*V. S. Belyayev*
*Ye. V. Kayevitser*
*I. D. Kashlakov*
347
Установка для измерения коллапса тока GaN-транзисторов в импульсном режиме
*И. М. Аболдуев*
*Н. В. Алкеев*
*В. С. Беляев*
*Е. В. Каевицер*
*И. Д. Кашлаков*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Requirements for the Parameters of Semiconductor Functional Elements of Radio-photonic Links in the Microwave Range
*A. A. Belousov*
*J. N. Volkhin*
*A. V. Gamilovskaya*
*A. A. Dubrovskaya*
350 Требования к параметрам полупроводниковых функциональных элементов радиофотонных трактов диапазона СВЧ
*А. А. Белоусов*
*Ю. Н. Вольхин*
*А. В. Гамиловская*
*А. А. Дубровская*

Practical Experience in Studies of the ORE Appearing in the Composition of Modules and Blocks Used in Space
*A. A. Pechenkin*
*A. B. Boruzdina*
*M. M. Novikova*
*A. R. Gritsayenko*
352 Практический опыт исследований проявления ОРЭ в составе модулей и блоков аппаратуры космического назначения
*А. А. Печенкин*
*А. Б. Боруздина*
*М. М. Новикова*
*А. Р. Грицаенко*

Opportunities and Prospects for Foundry Production of Silicon Microelectronics at Russian Semiconductor Factory
*N. A. Shelepin*
*P. V. Ignatov*
*G. K. Lukoshko*
*D. S. Shipitsin*
354 Возможности и перспективы контрактной разработки и производства кремниевой микроэлектроники на российской полупроводниковой фабрике
*Н. А. Шелепин*
*П. В. Игнатов*
*Г. К. Лукошко*
*Д. С. Шипицин*

**Design and Modeling Systems for Electronic Components and Devices**
**356 Системы проектирования и моделирования электронных компонентов и систем**

EDA Flow for ASICs, Synopsys Solutions — What's New?
*E. N. Ivanova*
356 Система автоматизированного проектирования СБИС, решения Synopsys: что нового?
*Е. Н. Иванова*

Requirements for Physical Verification of SnK in the Conditions of Transition to Subnanometer Technological Norms (Less than 16 nm)
*G. Sauter*
360 Требования к физической верификации СнК в условиях перехода на субнанометровые технологические нормы (менее 16 нм)
*Г. Саутер*

Native Technological Platform for Physical Design of Sub-nanometer SnK Technology of 16 nm and Below
*A. L. Lokhov*
363 Нативная технологическая платформа для физического проектирования субнанометровых СнК технологии 16 нм и ниже
*А. Л. Лохов*

Abstract Semantic Graph in HDL Simulation and Code Completion
*N. M. Malyshev*
365 Цифровое моделирование. Формирование семантического графа для кодогенерации и автодополнения кода
*Н. М. Малышев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Increasing Fault Tolerance (Hardness) of Mixed Signal IP-blocks
*V. D. Baykov*
*Y. M. Gerasimov*
*Y. Y. Petrichkovich*
*N. Y. Rannev*
368 Повышение сбоеустойчивости КМОП СФ-блоков смешанного сигнала
*В. Д. Байков*
*Ю. М. Герасимов*
*Я. Я. Петричкович*
*Н. Ю. Раннев*

Methods of TCAD-simulation of Microlens Parameters and Design the Output CCD Register Element with an Avalanche Gain of the Photosensitive CCD IC
*D. S. Yel'nikov*
*A. A. Kononov*
*N. S. Koptev*
*A. A. Pugachov*
370 Методики TCAD-моделирования параметров микролинз и конструкции элемента выходного ПЗС-регистра с лавинным усилением фоточувствительных ПЗС ИС
*Д. С. Ельников*
*А. А. Кононов*
*Н. С. Коптев*
*А. А. Пугачёв*

Compilers of Radiation-hardened Memory Based on 180/90 nm CMOS/SOI Technologies
*S. A. Ilin*
*O. V. Lastochkin*
*A. A. Novikov*
*D. S. Shipitsin*
373 Семейство компиляторов радиационно стойких блоков памяти по технологиям КМОП/КНИ с технологическими нормами 180/90 нм
*С. А. Ильин*
*О. В. Ласточкин*
*А. А. Новиков*
*Д. С. Шипицин*

A System for Preliminary Calculation of the Operating Points of Transistors in Order to Optimize the Configuration and Take into Account the LDE Parameters Influence for 28 nm CMOS Technology
*A. S. Nadin*
*A. V. Tyurin*
*D. S. Shipitsin*
376 Система предварительного расчета рабочих точек транзисторов для оптимизации конфигурации и учета влияния LDE-параметров для технологии КМОП 28 нм
*А. С. Надин*
*А. В. Тюрин*
*Д. С. Шипицин*

Research and Analysis of Standard Cells Characteristics at Placement Stage for 28 nm CMOS Technology
*S. A. Ilin*
*D. Yu. Kopeikin*
*O. V. Lastochkin*
*A. L. Matveev*
*A. A. Novikov*
*D. S. Shipitsin*
379 Исследование и анализ изменения характеристик стандартных цифровых элементов на этапе размещения топологии для технологии КМОП 28 нм
*С. А. Ильин*
*Д. Ю. Копейкин*
*О. В. Ласточкин*
*А. Л. Матвеев*
*А. А. Новиков*
*Д. С. Шипицин*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Using Dynamic Interface Forms for Pcell Development in VLSI CAD for 28 nm Technology
*A. V. Tyurin, I. E. Trifanikhina, M. A. Kirillov, A. S. Nadin, D. S. Shipitsin*
382 Использование принципов динамических форм при разработке параметризированных ячеек топологии PCELL в среде разработки СБИС для 28 нм
*А. В. Тюрин, И. Е. Трифанихина, М. А. Кириллов, А. С. Надин, Д. С. Шипицин*

Assessing the Dependence of Standard Cells Characteristics on the Layout Template Parameters for 28 nm CMOS Technology
*S. A. Ilin, D. Yu. Kopeikin, O. V. Lastochkin, D. S. Shipitsin*
384 Оценка зависимости характеристик стандартных цифровых элементов от параметров топологического конструктива для технологии КМОП 28 нм
*С. А. Ильин, Д. Ю. Копейкин, О. В. Ласточкин, Д. С. Шипицин*

Ways of Taking into Account the Influence of Atomic Lattice Stress in SPICE Models of Silicon Deep-submicron MOS Transistors
*D. S. Shipitsin, A. G. Potupchik, A. V. Shemyakin*
387 Исследование способов учета влияния стресса атомной решетки кремния в SPICE-моделях глубоко-субмикронных МОП-транзисторов
*Д. С. Шипицин, А. Г. Потупчик, А. В. Шемякин*

Thermal Simulation of a 1.4 kW Pulsed Power Amplifier Using AliceFlow Software with Langtry — Menter Turbulence Model
*K. A. Ivanov, Al. V. Redka*
391 Тепловое моделирование работы 1,4-кВт импульсного усилителя мощности с применением модели турбулентности Ментера — Лангтри в оригинальной программе AliceFlow
*К. А. Иванов, Ал. В. Редька*

Developing of CAD Systems for Designing Microwave Devices and MMICs in Russia — Difficulties and Opportunities
*L. I. Babak, Yu. V. Zavalin*
393 Создание отечественных САПР для проектирования СВЧ-устройств и полупроводниковых ИС: проблемы и возможности
*Л. И. Бабак, Ю. В. Завалин*

Implementing Self-timed Circuit Synthesis in Gate Array Basis
*L. P. Plekhanov, A. N. Denisov, Yu. G. Diachenko, D. I. Mamonov, N. V. Morozov, D. Y. Stepchenkov*
395 Реализация синтеза самосинхронных схем в базисе БМК
*Л. П. Плеханов, А. Н. Денисов, Ю. Г. Дьяченко, Д. И. Мамонов, Н. В. Морозов, Д. Ю. Степченков*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Specifics 22-nm Low Power Technology Node for Building Low Power SoC
*I. A. Fateev*
398
Особенности маршрута проектирования СнК с низким энергопотреблением по технологическим нормам 22 нм
*И. А. Фатеев*

The Strategy of Multipoint Generation of the Projection Matrices in the Problems of Model Order Reduction for Circuit Simulation
*M. M. Gourary*
*S. G. Rusakov*
*S. L. Ulyanov*
399
Стратегия многоточечной генерации матриц проектирования в задачах редукции моделей для схемотехнического анализа
*М. М. Гурарий*
*С. Г. Русаков*
*С. Л. Ульянов*

**Microwave Integrated Circuits and Modules**
401
**СВЧ интегральные схемы и модули**

Heterogeneous Integration — a New Era of Multifunctional Radio Electronics Devices Based on Heterogeneous Semiconductor Materials
*A. A. Borisov*
*V. A. Burobin*
401
Гетерогенная интеграция — новая эра многофункциональных устройств радиоэлектроники на разнородных полупроводниковых материалах
*А. А. Борисов*
*В. А. Буробин*

Features of Manufacturing Technology and Diamond Heat Sinks Application in Electronic Microwave Modules
*M. P. Dukhnovsky*
*A. K. Smirnova*
*Yu. Yu. Fedorov*
*S. V. Shcherbakov*
404
Особенности технологии изготовления и применения алмазных теплоотводов в электронных СВЧ-модулях
*М. П. Духновский*
*А. К. Смирнова*
*Ю. Ю. Федоров*
*С. В. Щербаков*

Basic Technology for the SHF and Power Electronics Production Based on GAN(Si)
*A. A. Kovalev*
*V. I. Yegorkin*
406
Базовая технология изготовления СВЧ- и силовой электроники на основе GaN(Si)
*А. А. Ковалев*
*В. И. Егоркин*

Setting up a Highly Reliable Solid State Microwave Components Production — Routines and First Experience
*A. G. Filaretov*
*V. P. Chaly*
*I. V. Shukov*
*A. L. Dudin*
*O. R. Fazylhanov*
*D. M. Krasovitsky*
408
Организация производства высоконадежных изделий твердотельной СВЧ ЭКБ: процедуры и первый опыт
*А. Г. Филаретов*
*В. П. Чалый*
*И. В. Шуков*
*А. Л. Дудин*
*О. Р. Фазылханов*
*Д. М. Красовицкий*

Experience in the Development of Monolithic Integrated Schemes Based on Nitride Heterostructures
*N. Ye. Ivanova*
*D. L. Gnatyuk*
*O. S. Matveyenko*
411
Опыт разработки монолитных интегральных схем на основе нитридных гетероструктур
*Н. Е. Иванова*
*Д. Л. Гнатюк*
*О. С. Матвеенко*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Automation of Blocks Design for Developing of SHF Microwave Multifunctional Integrated Chips Based on Domestic 0.25 Microns GaAs pHEMT Technology
*A. S. Sal'nikov, A. Ye. Goryainov, D. V. Bilevich, A. A. Metel', T. N. Fayl', Yu. A. Novichkova, A. A. Popov, A. A. Kalent'yev, I. M. Dobush*
413
Автоматизация проектирования блоков для построения СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе отечественной 0,25-мкм GaAs pHEMT-технологии
*А. С. Сальников, А. Е. Горяинов, Д. В. Билевич, А. А. Метель, Т. Н. Файль, Ю. А. Новичкова, А. А. Попов, А. А. Калентьев, И. М. Добуш*

High Frequency Equivalent Circuit Inductor Model
*V. F. Dmitrikov, V. M. Isaev, A. V. Kunevich, D. V. Shushpanov, A. Y. Petrochenko*
415
Высокочастотная модель катушки индуктивности
*В. Ф. Дмитриков, В. М. Исаев, А. В. Куневич, Д. В. Шушпанов, А. Ю. Петроченко*

Software Module for the Interfacing of Tools for a Synthesis of Circuit Solutions of SHF Integrated Chips with CAE Electronic Devices and Closed Elements Libraries
*A. A. Kalent'yev, Yu. A. Novichkova, T. N. Fayl, A. Ye. Goryainov, I. M. Dobush*
418
Программный модуль для сопряжения инструментов синтеза схемных решений СВЧ интегральных схем с закрытыми библиотеками элементов в САПР электронных устройств
*А. А. Калентьев, Ю. А. Новичкова, Т. Н. Файль, А. Е. Горяинов, И. М. Добуш*

Features of the Work of the Complex "Channelless Magnetron — Modulator"
*V. A. Mel'nikov*
420
Особенности работы комплекса «безнакальный магнетрон — модулятор»
*В. А. Мельников*

MMIC VCO 2–28 GHz Frequency Range Design Status Review
*A. A. Zaycev, A. V. Vagin, D. A. Balandin, A. D. Kuzmin, N. S. Surkov*
423
Анализ состояния разработки ИМС ГУН в диапазоне частот от 2 до 28 ГГц
*А. А. Зайцев, А. В. Вагин, Д. А. Баландин, А. Д. Кузьмин, Н. С. Сурков*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Research and Design of a 50 MHz — 5 GHz Quadrature Modulator with Integrated Frequency Synthesizer
*A. D. Kalyonov*
*L. V. Nedashkovskiy*
*R. S. Shabardin*
*J. J. Fedicheva*
*L. P. Ionov*
*I. I. Mukhin*
426
Исследование и разработка квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот в диапазоне 50 МГц — 5 ГГц
*А. Д. Калёнов*
*Л. В. Недашковский*
*Р. С. Шабардин*
*Ю. Ю. Федичева*
*Л. П. Ионов*
*И. И. Мухин*

High-voltage $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ HEMT Switch Integrated Circuit
*A. N. Maksimov*
*A. A. Krasnov*
*S. V. Korneev*
*M. M. Krymko*
429
Высоковольтная интегральная схема управляемого ключа HEMT на гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$
*А. Н. Максимов*
*А. А. Краснов*
*С. В. Корнеев*
*М. М. Крымко*

Developing RSSI with Integrated ADC for Domestic Technology
*V. V. Repin*
*D. N. Morozov*
*A. V. Dukhov*
*I. I. Mukhin*
432
Разработка RSSI-микросхем со встроенным АЦП для изготовления по отечественной технологии
*В. В. Репин*
*Д. Н. Морозов*
*А. В. Духов*
*И. И. Мухин*

Mm-wave Receiving Tract with Image Channel Suppression
*An. V. Redka*
*V. M. Minnebaev*
*V. V. Krasnov*
435
Приемный тракт миллиметрового диапазона с подавлением зеркального канала
*Ан. В. Редька*
*В. М. Миннебаев*
*В. В. Краснов*

SiGe BiCMOS Photonic-electronic Integrated Circuit and Receiver Module for 25 Gb/s Optical Links
*A. A. Kokolov*
*A. S. Koryakovtsev*
*F. I. Sheyerman*
*L. I. Babak*
*D. A. Konkin*
438
Фотонно-электронная интегральная схема на основе SiGe БиКМОП-технологии и модуль оптического приемника для систем передачи данных до 25 Гб/с
*А. А. Коколов*
*А. С. Коряковцев*
*Ф. И. Шеерман*
*Л. И. Бабак*
*Д. А. Конкин*

Increasing the Data Transmission Channel Bandwidth Over the Long Distances when the Signal is Propagated from the Spacecraft to the Ground Reception Stations in the Optical Visibility Conditions
*A. A. Revonchenkov*
*A. V. Perevezentsev*
*A. Yu. Lychagin*
*Yu. V. Burtsev*
*S. Yu. Drozdova*
440
Повышение пропускной способности канала передачи данных на большие расстояния при распространении сигнала от космического аппарата до наземных станций приема в условиях прямой видимости
*А. А. Ревонченков*
*А. В. Перевезенцев*
*А. Ю. Лычагин*
*Ю. В. Бурцев*
*С. Ю. Дроздова*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Evaluation of the Resolution of the X-range DCZ High-aligned Solid-state System of the Near Earth Deployment with Confirmation by the Experiment
*R. S. Boltikov*
*S. V. Boltikov*
*Yu. V. Burtsev*
*A. Yu. Lychagin*
*V. M. Minnebayev*
*A. A. Revonchenkov*
443 Оценка разрешения высокодетальной твердотельной системы ДЗЗ околоземного базирования X-диапазона с подтверждением натурным экспериментом
*Р. С. Болтиков*
*С. В. Болтиков*
*Ю. В. Бурцев*
*А. Ю. Лычагин*
*В. М. Миннебаев*
*А. А. Ревонченков*

Ultra-wideband Measurements on a Substrate Using the Electro-optic Sampling System
*A. V. Kleopin*
*M. A. Zenchenko*
447 Сверхширокополосные измерения на подложке с помощью электрооптической стробоскопической измерительной установки
*А. В. Клеопин*
*М. А. Зенченко*

On-wafer Standard of Units of Reflection and Transmission Coefficients
*A. S. Bondarenko*
*A. S. Borovkov*
*I. M. Malay*
*V. A. Semyonov*
450 Эталон единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур на пластине
*А. С. Бондаренко*
*А. С. Боровков*
*И. М. Малай*
*В. А. Семёнов*

Modern Measuring Instruments FORMULA to Control the Static Parameters of Semiconductor Devices, Including SHF-transistors
*O. Yu. Shor*
*A. V. Shustrov*
454 Современные средства измерений FORMULA для контроля статических параметров полупроводниковых приборов, в том числе СВЧ-транзисторов
*О. Ю. Шор*
*А. В. Шустров*

The Concept of Organizing Microwave Measurements of the Parameters of Power Amplifiers up to 40 GHz at the Probe Station in Serial Production. Problems and Ways to Solve them
*A. A. Voevodin*
456 Концепция организации СВЧ-измерений параметров GaAs МИС-усилителей мощности до 40 ГГц на зондовой станции в серийном производстве. Проблемы и пути их решения
*А. А. Воеводин*

Low-noise Amplifier of the Microwave Range Implemented as a System in Package Using LTCC Technology
*A. L. Vorozhtsov*
*I. M. Petrenko*
*P. A. Yust*
460 Малошумящий усилитель СВЧ-диапазона в исполнении системы в корпусе по технологии LTCC
*А. Л. Ворожцов*
*И. М. Петренко*
*П. А. Юст*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Bipolar High Voltage Driver Microchip with Overload Protection to Control PIN-diodes
*P. A. Dik*
*I. N. Volkov*
*V. R. Kucherskiy*
463 Биполярная микросхема высоковольтного драйвера с защитой от перегрузок для управления pin-диодами
*П. А. Дик*
*И. Н. Волков*
*В. Р. Кучерский*

Bipolar Driver Microchips with Galvanic Separation to Control the Power Transistors
*P. A. Dik*
*A. V. Vanyushkin*
*M. M. Krymko*
*V. R. Kucherskiy*
464 Биполярные микросхемы драйверов с гальванической развязкой для управления силовыми транзисторами
*П. А. Дик*
*А. В. Ванюшкин*
*М. М. Крымко*
*В. Р. Кучерский*

Intelligent Power Key with Increased Performance Characteristics
*M. M. Krymko*
*A. N. Maksimov*
*P. A. Dik*
*A. A. Krasnov*
*A. P. Ledovskikh*
*N. S. Kibirev*
466 Силовой интеллектуальный ключ с повышенными эксплуатационными характеристиками
*М. М. Крымко*
*А. Н. Максимов*
*П. А. Дик*
*А. А. Краснов*
*А. П. Ледовских*
*Н. С. Кибирев*

Multi-chip Module for Design the Step up and Step-down DC-DC Voltage Converters
*M. M. Krymko*
*S. V. Korneyev*
*I. Ye. Shumkov*
*A. N. Rostanin*
*A. G. Khrist'yanovskiy*
469 Многокристальный модуль для построения повышающих или понижающих DC-DC-преобразователей напряжения
*М. М. Крымко*
*С. В. Корнеев*
*И. Е. Шумков*
*А. Н. Ростанин*
*А. Г. Христьяновский*

**Microsystems. Sensors and Actuators** **473** **Микросистемы. Сенсоры и актюаторы**

Application of Digital Holographic Microscopy to Control the Microsystems Optical Elements
*M. G. Minin*
*A. A. Shaforostov*
473 Применение цифровой голографической микроскопии для контроля оптических элементов микросистем
*М. Г. Минин*
*А. А. Шафоростов*

Development of MEMS and Production of Micro-accelerometers, Micro-gyroscopes and Other Microsystems Engineering
*S. P. Timoshenkov*
*V. V. Kalugin*
*A. S. Timoshenkov*
475 Развитие МЭМС, создание микроакселерометров, микрогироскопов и других изделий микросистемной техники
*С. П. Тимошенков*
*В. В. Калугин*
*А. С. Тимошенков*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Experience of Developing and Manufacturing a High-precision Single-axis MEMS Gyroscope
*D. M. Urmanov*
*I. V. Markov*
*V. I. Markov*
477 Опыт разработки и изготовления высокоточного одноосевого МЭМС-гироскопа
*Д. М. Урманов*
*И. В. Марков*
*В. И. Марков*

Putting into Operation the MEMS-elements: from the Technology Design to the Serial Production
*D. G. Shamiryan*
*I. A. Rod*
479 Запуск МЭМС-элементов в производство: от разработки технологии до серийного выпуска
*Д. Г. Шамирян*
*И. А. Род*

Features of the Sensitive Elements Manufacturing Technology of the Pendulum Micro-accelerometer for Inertial Modules of Promising Technical Control Systems
*D. Yu. Obizhayev*
*S. A. Zhukova*
*S. Yu. Suzdal'tsev*
*T. V. Sal'nikova*
*S. Yu. Ivanov*
481 Особенности технологии изготовления чувствительных элементов маятникового микроакселерометра для инерциальных модулей перспективных систем технического контроля
*Д. Ю. Обижаев*
*С. А. Жукова*
*С. Ю. Суздальцев*
*Т. В. Сальникова*
*С. Ю. Иванов*

Study of the Influence of Technological Factors on the Characteristics of the WGM Resonator Made of $SiO_2$
*A. V. Yakuhina*
*A. S. Kadochkin*
*D. M. Grigorev*
*S. V. Nikiforov*
*V. V. Amelichev*
*V. V. Svetukhin*
484 Исследование влияния технологических факторов на характеристики МШГ-резонатора, изготовленного из $SiO_2$
*А. В. Якухина*
*А. С. Кадочкин*
*Д. М. Григорьев*
*С. В. Никифоров*
*В. В. Амеличев*
*В. В. Светухин*

Tunnel Magnetic Junction for Memory Systems and Magnetic Field Sensors
*I. Yu. Pashenkin*
*M. V. Sapozhnikov*
*N. S. Gusev*
*S. A. Gusev*
*D. A. Tatarsky*
*A. A. Fraerman*
487 Туннельные магнитные контакты для систем памяти и чувствительных датчиков магнитного поля
*И. Ю. Пашенькин*
*М. В. Сапожников*
*Н. С. Гусев*
*С. А. Гусев*
*Д. А. Татарский*
*А. А. Фраерман*

MEMS Switch for Microwave Power Limiter
*I. V. Kulinich*
*D. S. Khokhol*
*D. V. Baboshko*
*Ye. V. Shesterikov*
489 Микроэлектромеханический переключатель для СВЧ-ограничителя мощности
*И. В. Кулинич*
*Д. С. Хохол*
*Д. В. Бабошко*
*Е. В. Шестериков*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Features of the Technology of Forming Sensitive Elements of Inertial Sensors Based on the Structures of "Silicon over the Cavity", Sealing at the Level of Plates
*S. A. Zhukova, Ye. A. Novichkov, D. Yu. Obizhayev, S. Yu. Suzdal'tsev, V. Ye. Turkov, P. A. Romakhin, S. A. Ul'yanov, S. Yu. Ivanov*
493 Особенности технологии формирования чувствительных элементов инерциальных датчиков на основе структур «кремний над полостью», герметизируемых на уровне пластин
*С. А. Жукова, Е. А. Новичков, Д. Ю. Обижаев, С. Ю. Суздальцев, В. Е. Турков, П. А. Ромахин, С. А. Ульянов, С. Ю. Иванов*

Diode Pump Study for the Carrier Generator in Photonic Circuits
*P. O. Yakushenkov, E. A. Cheshev, M. V. Gorbunkov, I. M. Tupitsin*
495 Исследование диодной накачки для генератора несущей в фотонных схемах
*П. О. Якушенков, Е. А. Чешев, М. В. Горбунков, И. М. Тупицын*

Invasive Passive Wireless Temperature Sensors
*I. G. Antsev, S. V. Bogoslovskiy, G. A. Sapozhnikov*
497 Инвазивные пассивные беспроводные датчики температуры
*И. Г. Анцев, С. В. Богословский, Г. А. Сапожников*

Photon Integrated Circuits: Development Prospects and Production in Russia (Development of Technological Platforms of Integral Photonics)
*K. E. Pevchikh, V. V. Svetikov*
499 Фотонные интегральные схемы: перспективы разработки и производства в России (развитие технологических платформ интегральной фотоники)
*К. Э. Певчих, В. В. Светиков*

Developing a Technology for Obtaining a Dispersion Based on Al/Ni/$Fe_3O_4$ Nanopowders for Application to a Substrate by Additive Printing
*S. Yu. Pereverzeva, Yu. P. Shaman, A. V. Sysa, E. A. Lebedev, D. G. Gromov*
501 Разработка технологии получения дисперсии на основе нанопорошков Al / Ni / $Fe_3O_4$ для нанесения на подложку методом аддитивной печати
*С. Ю. Переверзева, Ю. П. Шаман, А. В. Сыса, Е. А. Лебедев, Д. Г. Громов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Investigating Metrological Properties of an Integral Thermal Conductivity Detector Under Conditions of Capillary Gas Chromatography
*V. I. Platonov*
*I. A. Platonov*
*M. M. Pozdnyakov*
*M. Yu. Chinenkov*
*N. A. Dyuzhev*
504 Исследование метрологических свойств детектора по теплопроводности на интегральной основе в условиях капиллярной газовой хроматографии
*В. И. Платонов*
*И. А. Платонов*
*М. М. Поздняков*
*М. Ю. Чиненков*
*Н. А. Дюжев*

The Forming Technology for a Cu-Sn Multilayer Structure for Sealing MEMS at the Plate Level
*A. V. Grabov*
*S. Yu. Suzdal'tsev*
*D. D. Riskin*
*D. Yu. Obizhayev*
*V. Ye. Turkov*
*S. A. Zhukova*
506 Технология формирования многослойной структуры Cu-Sn для герметизации МЭМС на уровне пластины
*А. В. Грабов*
*С. Ю. Суздальцев*
*Д. Д. Рискин*
*Д. Ю. Обижаев*
*В. Е. Турков*
*С. А. Жукова*

Reliable High Temperature Vacuum Compound of Multilayer LTCC Ceramics and Metal
*V. A. Kosevskoy*
*Ye. A. Skrynnik*
*A. V. Borodayev*
508 Надежное высокотемпературное вакуумплотное соединение многослойной LTCC-керамики и металла
*В. А. Косевской*
*Е. А. Скрынник*
*А. В. Бородаев*

The Temperature Shift Compensation for the Electrochemical Converters Characteristics
*V. G. Krishtop*
510 Компенсация температурного ухода характеристик электрохимических преобразователей
*В. Г. Криштоп*

Research on Filled Epoxy Resins Encapsulation and Chemical-Galvanic Metallization Process for Three-dimensional Packages with Edge Commutation
*I. A. Belyakov*
*D. V. Vertyanov*
*V. N. Sidorenko*
*A. V. Pogudkin*
*S. P. Timoshenkov*
512 Исследование процессов герметизации и химико-гальванической металлизации наполненных эпоксидных смол для трехмерных микросборок с торцевой коммутацией
*И. А. Беляков*
*Д. В. Вертянов*
*В. Н. Сидоренко*
*А. В. Погудкин*
*С. П. Тимошенков*

Technological Processes of Lead-free Bump Making on Discrete Chips with Aluminum Pads
*V. N. Sidorenko*
*D. V. Vertyanov*
*I. A. Belyakov*
516 Технологические процессы формирования бессвинцовых шариковых выводов на отдельных кристаллах с алюминиевыми контактными площадками
*В. Н. Сидоренко*
*Д. В. Вертянов*
*И. А. Беляков*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Temporary Bonding Technology for Transferring Registration Marks on Thin Wafers
*N. A. Djuzhev*
*E. E. Gusev*
*M. A. Makhiboroda*
*P. R. Mashevich*
*P. S. Ivanin*
*M. U. Fomichev*
520 Технология временного бондинга для переноса знаков совмещения на тонких пластинах
*Н. А. Дюжев*
*Е. Э. Гусев*
*М. А. Махиборода*
*П. Р. Машевич*
*П. С. Иванин*
*М. Ю. Фомичёв*

Resource Tests of cold Cathodes Created on the Basis of Carbon Nanowalls
*Z. R. Bavizhev*
*V. A. Samorodov*
*M. D. Bavizhev*
*S. P. Timoshenkov*
*I. M. Khuzin*
522 Ресурсные испытания холодных катодов, созданных на основе углеродных наностенок
*З. Р. Бавижев*
*В. А. Самородов*
*М. Д. Бавижев*
*С. П. Тимошенков*
*И. М. Хузин*

Electrochemical Gyroscope Error Correction Method
*P. V. Dudkin*
*D. A. Zhevnenko*
*Ye. S. Gornev*
*T. V. Krishtop*
*V. G. Krishtop*
525 Метод коррекции ошибки электрохимического гироскопа
*П. В. Дудкин*
*Д. А. Жевненко*
*Е. С. Горнев*
*Т. В. Криштоп*
*В. Г. Криштоп*

Development of an Energy-saving Complex Using Micronanosystem Equipment for Creating a Digital Copy of an Industrial Enterprise
*V. G. Chepakhin*
*S. O. Shepelev*
*S. P. Timoshenkov*
*Ye. V. Stepanov*
*V. A. Teterin*
527 Разработка энергосберегающего комплекса с использованием микронаносистемной техники для создания цифрового двойника промышленного предприятия
*В. Г. Чепахин*
*С. О. Шепелев*
*С. П. Тимошенков*
*Е. В. Степанов*
*В. А. Тетерин*

Coercivity Mechanism in $Ni_{0.76}Fe_{0.18}Co_{0.06}$ thin Films
*A. B. Grabov*
*A. A. Baranov*
*D. Yu. Obizhayev*
*S. A. Zhukova*
530 Механизм коэрцитивности в тонких пленках $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$
*А. Б. Грабов*
*А. А. Баранов*
*Д. Ю. Обижаев*
*С. А. Жукова*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Methods for Evaluating the Characteristics of the Thermoresistive Layer Based on Vanadium Oxide
*D. A. Yerastov*
*S. A. Zhukova*
*V. Ye. Turkov*
*S. A. Demin*
*B. V. Troshin*
*I. A. Rubtsov*
*Ye. D. Parysheva*
532 Методика оценки характеристик терморезистивного слоя на основе оксида ванадия
*Д. А. Ерастов*
*С. А. Жукова*
*В. Е. Турков*
*С. А. Демин*
*Б. В. Трошин*
*И. А. Рубцов*
*Е. Д. Парышева*

Measuring Photoelectric Parameters of Promising Detectors of Technical Vision Systems
*D. A. Koptsev*
*S. A. Zhukova*
*V. Ye. Turkov*
534 Измерение фотоэлектрических параметров перспективных детекторов систем технического зрения
*Д. А. Копцев*
*С. А. Жукова*
*В. Е. Турков*

Three-axis Magnetoresistive Weak Magnetic Field Transducer
*V. V. Amelichev*
*D. V. Kostyuk*
*D. V. Vasilyev*
*Y. V. Kazakov*
*D. A. Zhukov*
*E. P. Orlov*
*P. A. Belyakov*
537 Трехосевой магниторезистивный преобразователь слабого магнитного поля
*В. В. Амеличев*
*Д. В. Костюк*
*Д. В. Васильев*
*Ю. В. Казаков*
*Д. А. Жуков*
*Е. П. Орлов*
*П. А. Беляков*

Possibilities of Using MEMS Sensors for Non-invasive Diagnostics of Diseases
*V. M. Achildiev*
*Yu. K. Gruzevich*
*N. A. Bedro*
*Yu. N. Evseeva*
*M. E. Rulev*
*N. S. Konnova*
*M. A. Basarab*
540 Возможности применения MEMS-датчиков для неинвазивной диагностики заболеваний
*В. М. Ачильдиев*
*Ю. К. Грузевич*
*Н. А. Бедро*
*Ю. Н. Евсеева*
*М. Е. Рулев*
*Н. С. Коннова*
*М. А. Басараб*

Gimballes Inertial Block for the Vehicle Active Safety System
*V. M. Achil'diyev*
*Yu. K. Gruzevich*
*V. A. Soldatenkov*
*N. A. Bedro*
*M. Ye. Rulev*
*N. M. Zhuravlev*
543 Бесплатформенный инерциальный блок для системы активной безопасности транспортного средства
*В. М. Ачильдиев*
*Ю. К. Грузевич*
*В. А. Солдатенков*
*Н. А. Бедро*
*М. Е. Рулев*
*Н. М. Журавлев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Capacitive Biosensor for Measuring Electrical Potentials
*N. S. Gorlov*
*D. V. Vertyanov*
*S. P. Timoshenkov*
545 Емкостной биосенсор для измерения электрических потенциалов
*Н. С. Горлов*
*Д. В. Вертянов*
*С. П. Тимошенков*

Development and Research of a Micromechanical Shock Sensor
*E. S. Kochurina*
*A. I. Vinogradov*
*L. R. Boev*
*N. M. Zaryankin*
*S. A. Anchutin*
*A. S. Timoshenkov*
547 Разработка и исследование микромеханического датчика удара
*Е. С. Кочурина*
*А. И. Виноградов*
*Л. Р. Боев*
*Н. М. Зарянкин*
*С. А. Анчутин*
*А. С. Тимошенков*

Magnetic Properties of Thin Polycrystalline Permalloy Films for Anisotropic Magnetoresistive Structures
*N. A. Djuzhev*
*G. D. Demin*
*B. K. Medvedev*
*R. N. Andrushin*
*D. D. Noskova*
549 Магнитные свойства тонких поликристаллических пленок пермаллоя для анизотропных магниторезистивных структур
*Н. А. Дюжев*
*Г. Д. Демин*
*Б. К. Медведев*
*Р. Н. Андрюшин*
*Д. Д. Носкова*

Developing Planar MEMS Technology of Field-emission Metal Nanostructures as an Element Base for Vacuum Nanoelectronics
*T. A. Gryazneva*
*G. D. Demin*
*I. D. Evsikov*
*N. A. Djuzhev*
*M. A. Makhiboroda*
552 Разработка планарной МЭМС-технологии автоэмиссионных металлических наноструктур в качестве элементной базы вакуумной наноэлектроники
*Т. А. Грязнева*
*Г. Д. Демин*
*И. Д. Евсиков*
*Н. А. Дюжев*
*М. А. Махиборода*

Membrane MEMS-based Thermal Pressure Sensor for Measuring the Sub-atmospheric Pressure Range
*M. M. Pozdnyakov*
*I. D. Evsikov*
*G. D. Demin*
*G. I. Oreshkin*
*N. A. Dyuzhev*
*P. R. Mashevich*
554 Мембранный МЭМС-датчик давления на тепловом принципе действия для измерения субатмосферного диапазона давлений
*М. М. Поздняков*
*И. Д. Евсиков*
*Г. Д. Демин*
*Г. И. Орешкин*
*Н. А. Дюжев*
*П. Р. Машевич*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Calculating the Sensitivity of Thin-film Magnetoresistive Rotation Angle Sensors for a Robotic Smart Glove
*P. Yu. Glagolev*
*G. D. Demin*
*M. Yu. Chinenkov*
*N. A. Djuzhev*
557 Расчет чувствительности тонкопленочных магниторезистивных сенсоров угла поворота для роботизированной умной перчатки
*П. Ю. Глаголев*
*Г. Д. Демин*
*М. Ю. Чиненков*
*Н. А. Дюжев*

The Magnetic Orientation and Stabilization System Component of Block-modular Multipurpose "Synergy" Platform
*D. V. Malygin*
*D. S. Chaban*
*O. Ya. Yakovlev*
560 Компонент магнитной системы ориентации и стабилизации многоцелевой платформы «Синергия» блочно-модульного типа
*Д. В. Малыгин*
*Д. С. Чабан*
*О. Я. Яковлев*

A Project of a Small-sized Wide-band Thermal Vacuum Meter Based on the Comparison of the Measuring MEMS Resistance Sensor with the Compensation MEMS Sensors
*V. E. Skvortsov*
*M. A. Makhiboroda*
563 Проект малогабаритного широкодиапазонного теплового вакуумметра, работающего на основе сравнения измерительного MEMS-датчика сопротивления с компенсационными MEMS-датчиками
*В. Э. Скворцов*
*М. А. Махиборода*

The Gas Flow Thermal MEMS-sensors Study: Design, Location in the Gas Flow and Signal Generation
*N. A. Djuzhev*
*V. T. Ryabov*
*P. R. Mashevich*
*V. V. Sretenskiy*
*M. Y. Chinenkov*
565 Исследования тепловых МЭМС-сенсоров расхода газа: конструкция, расположение в потоке газа и формирование сигнала
*Н. А. Дюжев*
*В. Т. Рябов*
*П. Р. Машевич*
*В. В. Сретенский*
*М. Ю. Чиненков*

Investigating Mechanical Properties of Thin-film Membranes Used in MEMS Devices
*P. Yu. Glagolev*
*E. E. Gusev*
*M. A. Makhiboroda*
*N. A. Djuzhev*
567 Исследование механических свойств тонкопленочных мембран, используемых в МЭМС-приборах
*П. Ю. Глаголев*
*Е. Э. Гусев*
*М. А. Махиборода*
*Н. А. Дюжев*

**Special Technology Equipment**
**570 Специальное технологическое оборудование**

MOVPE Systems Family for Nitride Heterostructures Epitaxy. Concept and Verification
*W. V. Lundin*
*E. E. Zavarin*
*A. V. Sakharov*
*D. V. Davydov*
*A. F. Tsatsul'nikov*
570 Семейство установок для МОС-гидридной эпитаксии нитридных гетероструктур. Концепция и верификация
*В. В. Лундин*
*Е. Е. Заварин*
*А. В. Сахаров*
*Д. В. Давыдов*
*А. Ф. Цацульников*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


The Detailed Modeling of the Device Design and Characteristics of the Gallium Nitride Gaseous Epitaxy from Metal Organic Compounds on Silicon Plates dia. 200 mm
*D. S. Bazarevskiy*
*Ye. A. Kalaushina*
*A. A. Smirnovskiy*
*R. A. Talalayev*
573 Детальное моделирование конструкции установки и характеристик процесса газофазной эпитаксии нитрида галлия из металлоорганических соединений на пластинах кремния диаметром 200 мм
*Д. С. Базаревский*
*Е. А. Калаушина*
*А. А. Смирновский*
*Р. А. Талалаев*

Experimental Prototype of "Epiphase TM 200-01" System of Metalorganic Vapor Phase Epitaxy for Processing Substrates up to 200 mm in Diameter
*M. G. Biryukov*
*V. V. Odinokov*
*P. E. Afonin*
*A. V. Shubnikov*
*V. V. Panin*
*V. M. Ustinov*
*A. F. Tsatsulnikov*
*W. V. Lundin*
*E. E. Zavarin*
*V. N. Statsenko*
*S. D. Fedotov*
*R. A. Talalaev*
*D. S. Bazarevskii*
575 Экспериментальный образец установки газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений «Эпифаз ТМ 200-01» для обработки подложек диаметром до 200 мм
*М. Г. Бирюков*
*В. В. Одиноков*
*П. Е. Афонин*
*А. В. Шубников*
*В. В. Панин*
*В. М. Устинов*
*А. Ф. Цацульников*
*В. В. Лундин*
*Е. Е. Заварин*
*В. Н. Стаценко*
*С. Д. Федотов*
*Р. А. Талалаев*
*Д. С. Базаревский*

Complex Domestic Equipment Lines for Current and Prospective Technological Routes for the Production of Electronic Components
*A. N. Alexeev*
*S. I. Petrov*
577 Комплексирование линеек отечественного оборудования для текущих и перспективных технологических маршрутов производства ЭКБ
*А. Н. Алексеев*
*С. И. Петров*

Modern Requirements for Ion Implanters for High and Medium Currents and Ways of Their Implementation
*A. S. Krivenko*
*I. A. Bezrukov*
579 Современные требования к ионным имплантерам на большие и средние токи и пути их реализации
*А. С. Кривенко*
*И. А. Безруков*

Configurable Modular TXI Test Platform for Measuring and Monitoring Static and Dynamic Parameters of Semiconductor Devices
*A. V. Shustrov*
583 Конфигурируемая модульная тестовая платформа TXI для измерения и контроля статических и динамических параметров полупроводниковых приборов
*А. В. Шустров*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Experimental Operation of the VEGA ProVac 1500 Turbomolecular Pump as Part of a Vacuum Chamber
*A. Yu. Kochetkov*
*V. L. Bratskoy*
*N. I. Kostetskiy*
*V. S. Neverov*
*I. A. Shiryaev*
*S. V. Kobozev*
585 Экспериментальная эксплуатация турбомолекулярного насоса VEGA PROvac 1500 в составе вакуумной камеры
*А. Ю. Кочетков*
*В. Л. Братской*
*Н. И. Костецкий*
*В. С. Неверов*
*И. А. Ширяев*
*С. В. Кобозев*

New Technological Solutions for Laser Processing of Electronic Equipment
*S. G. Gornyy*
*K. V. Yudin*
*V. I. Yurevich*
587 Новые технологические решения лазерной обработки материалов электронной техники
*С. Г. Горный*
*К. В. Юдин*
*В. И. Юревич*

Equipment for Elimination of Submicron Defects
*V. I. Plebanovich*
*S. M. Avakaw*
589 Оборудование для устранения субмикронных дефектов
*В. И. Плебанович*
*С. М. Аваков*

Special Technologies for the Preparation of Deionized Water. Design Features and Optimization Methods
*D. A. Safonova*
593 Специальные технологии подготовки деионизованной воды. Особенности проектирования и методы оптимизации
*Д. А. Сафонова*

Electric Processing ECB. Configurable Complexes to Provide the Required Modes and Performance
*Yu. V. Gerasimenko*
597 Электротермотренировка ЭКБ. Конфигурируемые комплексы для обеспечения требуемых режимов и производительности
*Ю. В. Герасименко*

Molecular Contamination of Inorganic Origin in the Air (AMC) of Clean Industrial Premises. Development of Sampling and Analysis Methods for Samples with Detection Limits of Less than 10 ppt.
*A. V. Markin*
*A. D. Prosiy*
*A. P. Kimrova*
*A. S. Glinskiy*
*M. M. Tuboltseva*
599 Молекулярные загрязнения неорганического происхождения в воздухе (ВМЗ) чистых производственных помещений (ЧПП). Разработка методик отбора и анализа проб с пределами обнаружения менее 10 ppt
*А. В. Маркин*
*А. Д. Просий*
*А. П. Кимрова*
*А. С. Глинский*
*М. М. Тубольцева*

Ultrapure Water for Ultratrace Analyses on 1 ppt or Less Detection Limits
*A. A. Vasileva*
*A. S. Glinskiy*
*I. V. Leontyeva*
*A. D. Prosyi*
602 Реагентная вода для ультраследовых анализов на уровне предела обнаружения 1 ppt и менее
*А. А. Васильева*
*А. С. Глинский*
*И. В. Леонтьева*
*А. Д. Просий*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Improving Accuracy of Gas Supply to the Process Equipment with Temperature Correction of the External Environment
*S. V. Sazhnev*
*V. I. Khyazev*
604
Повышение точности подачи газов в технологическое оборудование с термокоррекцией внешней среды
*С. В. Сажнев*
*В. И. Князев*

Prospects for Solving of the Problems of Metrological Provision for the Development and Testing of Microelectronic Products by Domestic Measuring Instruments and Standards
*I. M. Malay*
607
Перспективы решения задач метрологического обеспечения разработки и испытаний изделий микроэлектроники на базе отечественных средств измерений и эталонов радиотехнических величин
*И. М. Малай*

Probe Measurements: from a Plate to an Atom
*Ye. A. Denisova*
611
Зондовые измерения: от пластины до атома
*Е. А. Денисова*

Measuring Electrical Characteristics with Temperature Testing. Does Metrology Make Sense?
*A. S. Sheykho*
613
Измерение электрических характеристик при внешнем воздействии. Есть ли смысл в метрологии?
*А. С. Шейхо*

Specifics of Finished Hardware-software Solutions for Testing MMIC Parameters. A Way to Developing a Real Time Automated Measuring System
*V. V. Smetanin*
615
Особенности готовых программно-аппаратных решений для тестирования параметров МИС. Путь к разработке автоматизированного измерительного комплекса реального времени
*В. В. Сметанин*

Die Sorting on Universal Automatic Die Bonding AMADYNE GmbH Platforms
*V. A. Bogoslovskiy*
619
Сортировка кристаллов с применением автоматических монтажных платформ AMADYNE GmbH
*В. А. Богословский*

New Generation of the Russian chip Testers Based on the Axle Open Standard
*S. N. Zaychenko*
*D. V. Shelever*
*A. V. Klimovskikh*
622
Новое поколение российских тестеров микросхем на основе открытого стандарта AXIe
*С. Н. Зайченко*
*Д. В. Шелевер*
*А. В. Климовских*

Applying a Multichannel Inspection System to Control Pure Plates Used in Power Electronics Devices
*M. G. Minin*
*A. A. Shaforostov*
624
Применение многоканальной системы инспекции для контроля чистых пластин, используемых в устройствах силовой электроники
*М. Г. Минин*
*А. А. Шафоростов*

Dynamics of Factors and Parameters for Cleanroom
*A. V. Markin*
*A. D. Prosii*
626
Динамика факторов и параметров чистых производственных помещений
*А. В. Маркин*
*А. Д. Просий*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


**Neuromorphic Calculations. Artificial Intelligence** 630 **Нейроморфные вычисления. Искусственный интеллект**

Neuromorphic Computer — from Physical Components to a Value System 630 Нейроморфный компьютер: от физических компонент до системы ценностей
*V. A. Demin, D. V. Nekhaev, A. V. Emelyanov, K. E. Nikiruy, I. A. Surazhevskiy, A. A. Minnekhanov, V. V. Rylkov, M. V. Kovalchuk*
*В. А. Демин, Д. В. Нехаев, А. В. Емельянов, К. Е. Никируй, И. А. Суражевский, А. А. Миннеханов, В. В. Рыльков, М. В. Ковальчук*

Temporal and Rate Coding of Patterns for Spiking Neuromorphic Networks Based on Memristors Learning 633 Временное и частотное кодирование образов для обучения импульсных нейроморфных сетей на основе мемристоров
*A. V. Emelyanov, K. E. Nikiruy, A. I. Ilyasov, I. A. Surazhevsky, A. V. Sitnikov, V. V. Rylkov, V. A. Demin*
*А. В. Емельянов, К. Э. Никируй, А. И. Ильясов, И. А. Суражевский, А. В. Ситников, В. В. Рыльков, В. А. Демин*

Neural Network Synaptic Weights Stabilization Effect Under the Influence of an Input Noise Signal 635 Эффект стабилизации синаптических весов нейросети под действием входного шумового сигнала
*I. A. Surazhevsky, V. A. Demin*
*И. А. Суражевский, В. А. Демин*

Elbrus Software and Hardware for AI 638 Программно-аппаратная платформа «Эльбрус» для решения задач искусственного интеллекта
*N. A. Bocharov*
*Н. А. Бочаров*

Solving the Problems of Modern HPC on the Cognitive RoboDeus SHB Platform 641 Решение задач современного HPC на когнитивной платформе RoboDeus SHB
*E. S. Yanakova, D. S. Kolesnikov, G. T. Macharadze*
*Е. С. Янакова, Д. С. Колесников, Г. Т. Мачарадзе*

Information Support for Multiscale Modeling of Neuromorphic Systems 643 Информационная поддержка для многомасштабного моделирования нейроморфных систем
*K. K. Abgaryan, E. S. Gavrilov*
*К. К. Абгарян, Е. С. Гаврилов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Practice of Using the MLPerf Inference Test Suite for Evaluating the Characteristics of Neural Network Computings
*S. V. Landyshev*
646 Практика применения набора тестов MLPerf Inference для оценки характеристик нейросетевых вычислителей
*С. В. Ландышев*

Artificial Electronics is a Strong Hybrid Intelligence System for Research in Microelectronics
*V. P. Dorofeyev*
648 Искусственный электроник — система сильного гибридного интеллекта для исследований в микроэлектронике
*В. П. Дорофеев*

Improving the Efficiency of Automatic Care of Agricultural Crops Based on the Use of Machine Vision and Artificial Intelligence Methods
*A. A. Kir'yanov*
*S. B. Benevolenskii*
*I. K. Bel'chenko*
650 Повышение эффективности автоматического ухода за сельскохозяйственными культурами на основе применения машинного зрения и методов искусственного интеллекта
*А. А. Кирьянов*
*С. Б. Беневоленский*
*И. К. Бельченко*

Domain Walls and Skyrmions as Elements of Neuromorphic Devices
*M. V. Logunov*
*S. A. Nikitov*
652 Доменные границы и скирмионы как элементы нейроморфных устройств
*М. В. Логунов*
*С. А. Никитов*

Neuromorphic Systems Based on High-dimensional Brain Concept and Memristive Devices
*S. A. Shchanikov*
*S. A. Lobov*
*A. N. Mikhaylov*
*V. B. Kazantsev*
*V. A. Makarov*
655 Нейроморфные системы на базе концепции многомерного мозга и мемристивных устройств
*С. А. Щаников*
*С. А. Лобов*
*А. Н. Михайлов*
*В. Б. Казанцев*
*В. А. Макаров*

Memristive Devices for Information Security Systems
*A. N. Mikhaylov*
*D. S. Korolev*
*A. I. Belov*
*D. V. Guseinov*
*M. O. Shamshin*
*A. N. Sharapov*
*V. I. Lukoyanov*
*Y. V. Pershin*
657 Мемристивные устройства для систем информационной безопасности
*А. Н. Михайлов*
*Д. С. Королев*
*А. И. Белов*
*Д. В. Гусейнов*
*М. О. Шамшин*
*А. Н. Шарапов*
*В. И. Лукоянов*
*Ю. В. Першин*

Broadband Neuromorphic Photosensors Based on Photomemristive Low-dimensional Crystals and Van der Waals Heterostructures
*G. N. Panin*
659 Широкополосные нейроморфные фотосенсоры на основе фотомемристивных низкоразмерных кристаллов и Ван-дер-Ваальсовых гетероструктур
*Г. Н. Панин*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Theoretical and Experimental Study of Multilevel Non-Volatile Memory for Neuromorphic Applications
*S. V. Koveshnikov*
*M. I. Fedotov*
662 Теоретические и экспериментальные исследования элементов энергонезависимой многоуровневой памяти для нейроморфных систем
*С. В. Ковешников*
*М. И. Федотов*

Memristor Structures Based on Electrochemical Titanium Oxide for ReRAM and Neuromorphic Applications
*V. A. Smirnov*
*V. I. Avilov*
*R. V. Tominov*
*A. A. Fedotov*
*O. A. Ageev*
*I. Valov*
664 Мемристорные структуры на основе электрохимического оксида титана для ReRAM и нейроморфных применений
*В. А. Смирнов*
*В. И. Авилов*
*Р. В. Томинов*
*А. А. Федотов*
*О. А. Агеев*
*И. Валов*

Laser Synthesis of Thin Films of Niobium and Tantalum Oxides and Memristors Based on Them
*O. A. Novodvorsky*
*O. D. Khramova*
*L. S. Parshina*
*D. S. Gusev*
*V. A. Mikhalevsky*
*E. A. Cherebylo*
*A. S. Polyakov*
666 Лазерный синтез тонких пленок оксидов ниобия и тантала и мемристоров на их основе
*О. А. Новодворский*
*О. Д. Храмова*
*Л. С. Паршина*
*Д. С. Гусев*
*В. А. Михалевский*
*Е. А. Черебыло*
*А. С. Поляков*

Phase-changing Materials for Neuromorphic Applications
*V. V. Ionin*
*A. V. Kiselev*
*A. A. Burtsev*
*N. N. Yeliseyev*
*V. A. Mikhalevskiy*
*A. A. Lotin*
669 Фазоизменяемые материалы для нейроморфных приложений
*В. В. Ионин*
*А. В. Киселев*
*А. А. Бурцев*
*Н. Н. Елисеев*
*В. А. Михалевский*
*А. А. Лотин*

Silicon on Nanometer-thick High-k Dielectric Structures
*V. P. Popov*
*F. V. Tikhonenko*
*A. K. Gutakovskii*
*A. V. Miakonkikh*
*K. V. Rudenko*
*I. E. Tyschenko*
671 Структуры «кремний на high-k-диэлектрике» нанометровой толщины
*В. П. Попов*
*Ф. В. Тихоненко*
*А. К. Гутаковский*
*А. В. Мяконьких*
*К. В. Руденко*
*И. Е. Тысченко*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Study of the Dependence of Electrical Conductivity in Memristors Based on Germanium Selenide with a Self-forming Current-Conducting Channel Under Various Operating Conditions
*A. N. Alyoshin*
*O. A. Ruban*
673 Исследование зависимости электропроводности в мемристорах на основе селенида германия с самоформирующимся токопроводящим каналом при различных условиях работы
*А. Н. Алёшин*
*О. А. Рубан*

The Control Principle of the Threshold Parameters in Binary Non-reactive Generators Based on Membrane Devices
*V. V. Rakitin*
*S. G. Rusakov*
675 Принцип управления пороговыми параметрами в бинарных безреактивных генераторах на мемристорных приборах
*В. В. Ракитин*
*С. Г. Русаков*

Crystal Structure and Resistive Switching in NiO
*S. I. Bozhko*
*S. V. Chekmazov*
*A. A. Mazilkin*
*B. O. Mukhamedov*
*A. M. Ionov*
*I. A. Smirnova*
*A. V. Ponomareva*
*D. A. Shulyatev*
*I. A. Abrikosov*
677 Кристаллическая структура и резистивные переключения в NiO
*С. И. Божко*
*С. В. Чекмазов*
*А. А. Мазилкин*
*Б. О. Мухамедов*
*А. М. Ионов*
*И. А. Смирнова*
*А. В. Пономарева*
*Д. А. Шулятев*
*И. А. Абрикосов*

Forming-free Nonfilamentary Resistive Switching in W/WOx/$HfO_2$/Ru Three-dimensional Structures
*A. A. Koroleva*
*M. G. Kozodaev*
*A. M. Markeev*
680 Бесформовочное нефиламентарное резистивное переключение в трехмерных структурах W / $WO_x$ / $HfO_2$ / Ru
*А. А. Королева*
*М. Г. Козодаев*
*А. М. Маркеев*

Memristors Based on Heteroepitaxial SiGe Structures
*D. O. Filatov*
*M. E. Shenina*
*D. A. Antonov*
*A. V. Kruglov*
*V. G. Shengurov*
*S. A. Denisov*
*V. E. Kotomina*
*I. N. Antonov*
*O. N. Gorshkov*
683 Мемристоры на основе гетероэпитаксиальных структур SiGe
*Д. О. Филатов*
*М. Е. Шенина*
*Д. А. Антонов*
*А. В. Круглов*
*В. Г. Шенгуров*
*С. А. Денисов*
*В. Е. Котомина*
*И. Н. Антонов*
*О. Н. Горшков*

Nanoscale Multiferroics for Magnonic Neuromorphic Architecture
*M. A. Morozova*
*O. V. Matveev*
*D. V. Romanenko*
*A. M. Mednikov*
685 Наноразмерные мультиферроики для применения в магнонной нейроморфной архитектуре
*М. А. Морозова*
*О. В. Матвеев*
*Д. В. Романенко*
*А. М. Медников*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Investigation of Memristive Planar Structures Based on Doped Manganites
*N. A. Tulina, A. N. Rossolenko, I. M. Shmytko, A. A. Ivanov, A. V. Zotov, V. V. Sirotkin, I. Y. Borisenko, V. A. Tulin*
688
Исследование мемристивных планарных структур на основе легированных манганитов
*Н. А. Тулина, А. Н. Россоленко, И. М. Шмытько, А. А. Иванов, А. В. Зотов, В. В. Сироткин, И. Ю. Борисенко, В. А. Тулин*

Associative Memory of a System of Antiferromagnetic Oscillators for Image Recognition Task
*A. Yu. Mitrofanova, A. R. Safin, D. P. Egorov, O. V. Kravchenko, N. I. Bazenkov*
691
Ассоциативная память системы антиферромагнитных осцилляторов для задачи распознавания изображений
*А. Ю. Митрофанова, А. Р. Сафин, Д. П. Егоров, О. В. Кравченко, Н. И. Базенков*

Research on the Possibility of Constructing a Digital Twin of Integrated Circuits for Analyzing and Predicting Their Reliability
*O. A. Telminov, E. S. Gornev, N. V. Chernyaev, S. I. Yanovich, L. A. Moshkarova, M. V. Shakhmanova*
694
Исследование возможности построения цифрового двойника интегральных схем для анализа и прогнозирования их надежности
*О. А. Тельминов, Е. С. Горнев, Н. В. Черняев, С. И. Янович, Л. А. Мошкарова, М. В. Шахманова*

OPC Runtime Estimation Model for Calibre OPCpro
*A. V. Kuzovkov, V. V. Ivanov, N. N. Balan, E. L. Kharchenko*
696
Модель оценки времени выполнения OPC для Calibre OPCpro
*А. В. Кузовков, В. В. Иванов, Н. Н. Балан, Е. Л. Харченко*

The Controlled Contrast Dynamics of the GeTe and $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Films Optical Properties
*A. V. Kiselev, V. V. Ionin, A. A. Burtsev, N. N. Yeliseyev, V. A. Mikhalevskiy, A. A. Lotin*
698
Динамика управляемого контраста оптических свойств тонких пленок GeTe и $Ge_2Sb_2Te_5$
*А. В. Киселев, В. В. Ионин, А. А. Бурцев, Н. Н. Елисеев, В. А. Михалевский, А. А. Лотин*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Study of Electrical Conductivity at the Phase Transitions in Thin Films GeTe and GST Under the Action of Nanosecond Laser Radiation
*N. N. Yeliseyev, V. V. Ionin, A. V. Kiselev, A. A. Burtsev, V. A. Mikhalevskiy, A. A. Lotin*
700 Исследование электрической проводимости при фазовых переходах в тонких пленках GeTe и GST под действием лазерного излучения наносекундной длительности
*Н. Н. Елисеев, В. В. Ионин, А. В. Киселев, А. А. Бурцев, В. А. Михалевский, А. А. Лотин*

Memristive Structures Based on Bismuth Selenide Flakes
*A. V. Zotov, A. I. Ilyin, O. V. Trofimov, V. A. Tulin*
702 Мемристивные структуры на основе флейков селенида висмута
*А. В. Зотов, А. И. Ильин, О. В. Трофимов, В. А. Тулин*

Research on the Effect of the Bottom Contact and Thickness on Resistive Switching in Nanocrystalline ZnO Films for Neuromorphic Systems
*R. V. Tominov, I. A. Shikhovtsov, I. S. Ugryumov, Z. E. Vakulov, V. A. Smirnov*
705 Исследование влияния материала нижнего контакта и толщины нанокристаллических пленок ZnO на их резистивное переключение для создания элементов нейроморфных систем
*Р. В. Томинов, И. А. Шиховцов, И. С. Угрюмов, З. Е. Вакулов, В. А. Смирнов*

Content-addressable Memory Based on Two-gate Ferroelectric Transistors
*M. S. Tarkov, V. P. Popov, A. N. Leushin, F. V. Tikhonenko*
707 Контентно-адресуемая память на основе двухзатворных сегнетоэлектрических транзисторов
*М. С. Тарков, В. П. Попов, А. Н. Леушин, Ф. В. Тихоненко*

Modeling the Effect of Thermal Processes on the Volt-ampere Characteristic of Bipolar Membrane Based on Hafnium Oxide
*A. N. Alyoshin, N. V. Zenchenko, O. A. Ruban*
709 Моделирование влияния тепловых процессов на вольт-амперную характеристику биполярного мемристора на основе оксида гафния
*А. Н. Алёшин, Н. В. Зенченко, О. А. Рубан*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


**Quantum Technologies and Sensors** 711 **Квантовые технологии — квантовые сенсоры**

Strengthening the Photocurrent in the Layers of Quantum Points of Ge/Si Modes of a Two-dimensional Photonic Crystal 711 Усиление фототока в слоях квантовых точек Ge/Si-модами двумерного фотонного кристалла

*A. V. Dvurechenskiy, A. I. Yakimov, A. A. Bloshkin, V. V. Kiriyenko, D. Ye. Utkin*

*А. В. Двуреченский, А. И. Якимов, А. А. Блошкин, В. В. Кириенко, Д. Е. Уткин*

Semiconductor Trigger Generators of Single Photons in Telecommunication Spectral Ranges for Quantum Systems of Information Processing and Transmission 713 Полупроводниковые триггерные генераторы одиночных фотонов в телекоммуникационных спектральных диапазонах для квантовых систем обработки и передачи информации

*A. A. Toropov, S. V. Sorokin, G. V. Klimko, M. V. Rakhlin, I. V. Sedova, N. A. Maleev, S. A. Blokhin, A. P. Vasiliev, V. M. Ustinov, M. M. Kulagina, Yu. M. Zadiranov*

*А. А. Торопов, С. В. Сорокин, Г. В. Климко, М. В. Рахлин, И. В. Седова, Н. А. Малеев, С. А. Блохин, А. П. Васильев, В. М. Устинов, М. М. Кулагина, Ю. М. Задиранов*

Semiconductor Trigger Emitters of Single Photons in the Solar-blind Ultraviolet Range for Space and Atmospheric Optical Communication Lines 717 Полупроводниковые триггерные эмиттеры одиночных фотонов в солнечно-слепом ультрафиолетовом диапазоне для защищенных космических и атмосферных линий связи

*V. N. Jmerik, E. A. Europeitsev, D. V. Nechaev, A. N. Semenov, D. S. Berezina, M. M. Kulagina, T. V. Shubina*

*В. Н. Жмерик, Е. А. Европейцев, Д. В. Нечаев, А. Н. Семенов, Д. С. Березина, М. М. Кулагина, Т. В. Шубина*

Absolute Quantum Photometry 720 Абсолютная квантовая фотометрия

*K. A. Kuznetsov, D. A. Safronenkov, P. A. Prudkovskii, A. A. Leontyev, T. I. Novikova, K. G. Katamadze, N. A. Borshevskaya, G. Kh. Kitaeva*

*К. А. Кузнецов, Д. А. Сафроненков, П. А. Прудковский, А. А. Леонтьев, Т. И. Новикова, К. Г. Катамадзе, Н. А. Борщевская, Г. Х. Китаева*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Single Photons Detectors for Quantum Communications
*I. I. Ryabtsev*
*V. V. Preobrazhenskiy*
*I. B. Chistokhin*
*M. A. Putyato*
*N. A. Valisheva*
*Ye. A. Yemel'yanov*
*M. O. Petrushkov*
*A. S. Pleshkov*
*D. B. Tret'yakov*
*I. G. Neizvestnyy*
*A. V. Latyshev*
724

Детекторы одиночных фотонов для квантовых коммуникаций
*И. И. Рябцев*
*В. В. Преображенский*
*И. Б. Чистохин*
*М. А. Путято*
*Н. А. Валишева*
*Е. А. Емельянов*
*М. О. Петрушков*
*А. С. Плешков*
*Д. Б. Третьяков*
*И. Г. Неизвестный*
*А. В. Латышев*

Design and Fabrication Technology of a Single Photon Detector Based on an InP / InGaAs / InP Avalanche Photodiode for Quantum Communications
*V. V. Preobrazhenskii*
*I. B. Chistokhin*
*M. A. Putyato*
*N. A. Valisheva*
*E. A. Emelyanov*
*M. O. Petrushkov*
*A. S. Pleshkov*
*I. G. Neizvestny*
*I. I. Ryabtsev*
*A. V. Latyshev*
727

Конструкция и технология изготовления детектора одиночных фотонов на базе лавинного фотодиода InP / InGaAs / InP для квантовых коммуникаций
*В. В. Преображенский*
*И. Б. Чистохин*
*М. А. Путято*
*Н. А. Валишева*
*Е. А. Емельянов*
*М. О. Петрушков*
*А. С. Плешков*
*И. Г. Неизвестный*
*И. И. Рябцев*
*А. В. Латышев*

Exceptional Point Based Quantum Sensors
*A. A. Gorbatsevich*
*N. M. Shubin*
731

Квантовые сенсоры на особых точках
*А. А. Горбацевич*
*Н. М. Шубин*

Elemental Base of High-temperature Quantum Sensory and Photonics Based on Atomic and Atom-like Quantum Systems
*A. N. Anisimov*
*P. G. Baranov*
*A. K. Vershovskiy*
733

Элементная база высокотемпературной квантовой сенсорики и фотоники на основе атомарных и атомоподобных квантовых систем
*А. Н. Анисимов*
*П. Г. Баранов*
*А. К. Вершовский*

Optical Waveguides in Lithium Niobate: from Key Distribution Modulators to the Quantum Photonic Integrated Circuits
*A. V. Shamray*
*I. V. Il'ichev*
*A. A. Usikova*
*P. M. Agruzov*
*V. V. Lebedev*
735

Оптические волноводы в ниобате лития: от модуляторов для распределения ключа до квантовых фотонных интегральных схем
*А. В. Шамрай*
*И. В. Ильичев*
*А. А. Усикова*
*П. М. Агрузов*
*В. В. Лебедев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Compensation for Thermal Expansion and Thermal Noise in Optical Reference Cavities
*N. O. Zhadnov*
*D. S. Kryuchkov*
*K. S. Kudeyarov*
*G. A. Vishnyakova*
*A. V. Masalov*
*K. Yu. Khabarova*
*N. N. Kolachevsky*
737 Компенсация теплового расширения и тепловых шумов опорных оптических резонаторов
*Н. О. Жаднов*
*Д. С. Крючков*
*К. С. Кудеяров*
*Г. А. Вишнякова*
*А. В. Масалов*
*К. Ю. Хабарова*
*Н. Н. Колачевский*

The Effect of Optical Lattice on the Frequency of the Clock Transition in Thulium Atoms and Methods for Controlling the Population of Vibrational States
*D. A. Mishin*
*D. I. Provorchenko*
*A. A. Golovizin*
*E. S. Fedorova*
*D. O. Tregubov*
*K. Yu. Khabarova*
*V. N. Sorokin*
*N. N. Kolachevsky*
740 Влияние оптической решетки на частоту часового перехода в атомах тулия и методы управления населенностью колебательных состояний
*Д. А. Мишин*
*Д. И. Проворченко*
*А. А. Головизин*
*Е. С. Федорова*
*Д. О. Трегубов*
*К. Ю. Хабарова*
*В. Н. Сорокин*
*Н. Н. Колачевский*

Probing Non-Markovian Quantum Dynamics with Data-driven Analysis: Beyond “Black-box” Machine Learning Models
*I. A. Luchnikov*
*E. O. Kiktenko*
*M. A. Gavreev*
*H. Ouerdane*
*S. N. Filippov*
*A. K. Fedorov*
744 Анализ немарковской квантовой динамики методами машинного обучения
*И. А. Лучников*
*Е. О. Киктенко*
*М. А. Гавреев*
*Х. Уэрдан*
*С. Н. Филиппов*
*А. К. Федоров*

Extracting Non-Markovian Component of Quantum Dynamics within the Pseudo-stochastic Representation
*E. O. Kiktenko*
*V. I. Yashin*
*A. S. Mastiukova*
*A. K. Fedorov*
747 Выделение немарковской компоненты квантовой динамики в псевдостохастическом представлении
*Е. О. Киктенко*
*В. И. Яшин*
*А. С. Мастюкова*
*А. К. Федоров*

The Scientaomicron Instruments and Technologies for the Study of Electronic and Electrophysical Properties of New Materials for Microelectronics
*A. A. Shaforostov*
*M. A. Trusov*
750 Приборы и технологии ScientaOmicron для исследования электронных и электрофизических свойств новых материалов для микроэлектроники
*А. А. Шафоростов*
*М. А. Трусов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Analysing Markovian and Non-Markovian Quantum Dynamics in Pseudostochastic Representation
*A. S. Mastiukova*
*V. I. Yashin*
*E. O. Kiktenko*
*A. K. Fedorov*
752 Исследование марковской и немарковской квантовой динамики в псевдостохастическом представлении
*А. С. Мастюкова*
*В. И. Яшин*
*Е. О. Киктенко*
*А. К. Федоров*

Two-pass Optical Scheme for a Quantum Key Distribution System with Coding on Subcarrier Frequencies of a Modulated Radiation
*O. I. Bannik*
*Ye. S. Moiseyev*
755 Двухпроходная оптическая схема для системы квантового распределения ключа с кодированием на поднесущих частотах модулированного излучения
*О. И. Банник*
*Е. С. Моисеев*

Development of Optical Quantum Memory in Waveguide Structures in the Tm+:$Y_3Al_5O_{12}$ Crystal
*A. V. Pavlov*
*M. M. Minnegaliyev*
*K. I. Gerasimov*
*R. V. Urmancheyev*
*T. A. Rupasov*
*Ye. S. Moiseyev*
*A. A. Kalinkin*
*S. P. Kulik*
*S. A. Moiseyev*
756 Разработка оптической квантовой памяти в волноводных структурах в кристалле Tm+:$Y_3Al_5O_{12}$
*А. В. Павлов*
*М. М. Миннегалиев*
*К. И. Герасимов*
*Р. В. Урманчеев*
*Т. А. Рупасов*
*Е. С. Моисеев*
*А. А. Калинкин*
*С. П. Кулик*
*С. А. Моисеев*

Efficient Simulation of Multiqubit Circuits
*I. A. Luchnikov*
*A. V. Berezutskii*
*E. O. Kiktenko*
*A. K. Fedorov*
758 Эффективное моделирование многокубитных цепочек
*И. А. Лучников*
*А. В. Березуцкий*
*Е. О. Киктенко*
*А. К. Федоров*

**School for Young Scientists** **761** **Школа молодых ученых**

Automated Design Method for Microwave Monolithic Distributed Amplifier
*A. A. Metel*
*Y. A. Novichkova*
761 Методика автоматизированного проектирования СВЧ-усилителей с распределенным усилением
*А. А. Метель*
*Ю. А. Новичкова*

Research on Hot Carriers Effect in MOS Transistors with Different Gate Length
*M. V. Kudryavtsev*
*A. V. Voevodin*
*A. A. Mihailov*
763 Исследование эффекта горячих носителей в МОП-транзисторах с различной длиной канала
*М. В. Кудрявцев*
*А. В. Воеводин*
*А. А. Михайлов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Integral Electrostatic Microelectromechanical Logic Gate with Movable Gate Electrode
*A. A. Solovev*
*E. F. Pevtsov*
765 Интегральный электростатический микроэлектромеханический логический вентиль с подвижным затворным электродом
*А. А. Соловьев*
*Е. Ф. Певцов*

Model's Equations for MOSFET Layout Dependent Effects
*A. V. Kirillova*
*A. G. Potupchik*
*A. V. Shemyakin*
767 Уравнения модели для эффектов, зависящих от топологии (LDE) в КМОП-технологии
*А. В. Кириллова*
*А. Г. Потупчик*
*А. В. Шемякин*

Potential Distribution in Sensor-electrolytic Systems with Dielectrophoretic Analyte Control
*E. G. Zaytseva*
*O. V. Naumova*
*A. L. Aseev*
*V. M. Generalov*
*A. S. Safatov*
769 Распределения потенциалов в системах сенсор — электролит с диэлектрофоретическим управлением аналитом
*Э. Г. Зайцева*
*О. В. Наумова*
*А. Л. Асеев*
*В. М. Генералов*
*А. С. Сафатов*

Analysing Dominant Scattering Mechanisms in Structures Based on Thin Films
*E. G. Zaytseva*
*O. V. Naumova*
771 Анализ доминирующих механизмов рассеяния в тонких пленках
*Э. Г. Зайцева*
*О. В. Наумова*

An Interval Approach to the Problem of Modeling Memristive Elements
*A. Y. Morozov*
*K. K. Abgaryan*
*D. L. Reviznikov*
773 Интервальный подход к задаче моделирования мемристивных элементов
*А. Ю. Морозов*
*К. К. Абгарян*
*Д. Л. Ревизников*

Applying the Method of Statistical Forecasting of Degradation of Scheme Parameters for Reliability Indexes Assessment
*A. V. Seletskiy*
*A. V. Solovev*
776 Применение методики статистического прогнозирования деградации параметров схемы для оценки показателей надежности
*А. В. Селецкий*
*А. В. Соловьев*

Research on Microwave Losses in Transmission Lines in AlGaN/GaN on Silicon Structures
*M. S. Romodin*
*G. V. Baranov*
*A. A. Dorofeev*
*P. V. Panasenko*
*A. V. Tsarev*
779 Исследование потерь СВЧ-сигнала в линиях передач на основе гетероструктуры AlGaN/GaN на кремнии
*М. С. Ромодин*
*Г. В. Баранов*
*А. А. Дорофеев*
*П. В. Панасенко*
*А. В. Царев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Analysing Technological Platforms for Integred Radiophoton Circuits
*I. D. Skuratov*
*G. V. Baranov*
*P. V. Panasenko*
782 Анализ технологических платформ производства интегральных радиофотонных схем
*И. Д. Скуратов*
*Г. В. Баранов*
*П. В. Панасенко*

Studies of the Configuration of VLSI Topological Elements and the Development of an Algorithm for Generating Test Structures Libraries
*U. A. Sahashchik*
*E. V. Sokolova*
784 Исследования конфигурации топологических элементов СБИС и разработка алгоритма генерации библиотек тестовых структур
*У. А. Сахащик*
*Е. В. Соколова*

The Photoresist Profile Simulation in Self-aligned Double Patterning Process Taking into Account the Problem of Hot Spots Correction
*E. D. Tikhonova*
786 Моделирование профиля фоторезиста в процессе самосовмещенного двойного паттернирования с учетом коррекции проблемы горячих точек
*Е. Д. Тихонова*

Diagnostics of the Scanning Electronic Microscope for the System and Random Errors Presence in Photolithography
*E. D. Tikhonova*
*M. A. Bildanov*
*E. S. Gornev*
788 Диагностика сканирующего электронного микроскопа на наличие системных и случайных ошибок в процессе фотолитографии
*Е. Д. Тихонова*
*М. А. Билданов*
*Е. С. Горнев*

Atomic Layer Deposition of Thin Films of Hafnium Oxide Using Izofaz TM 200-01 System
*S. S. Zyuzin*
*A. A. Rezvanov*
*E. S. Gornev*
*V. V. Panin*
*V. A. Gvozdev*
*Y. G. Zasseyev*
791 Плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния
*С. С. Зюзин*
*А. А. Резванов*
*Е. С. Горнев*
*В. В. Панин*
*В. А. Гвоздев*
*Я. Г. Зассеев*

Research on Properties of Memristor Model Parameters Extraction
*E. S. Shamin*
*D. A. Zhevnenko*
*F. P. Meshchaninov*
*V. S. Kozhevnikov*
*E. S. Gornev*
794 Исследование особенностей экстракции параметров модели мемристора
*Е. С. Шамин*
*Д. А. Жевненко*
*Ф. П. Мещанинов*
*В. С. Кожевников*
*Е. С. Горнев*

Physical Model of Resistive Switching in ReRAM Structures Based on Hafnium Oxide
*E. A. Ganykina*
*A. A. Rezvanov*
*E. S. Gornev*
797 Физическая модель резистивного переключения в ReRAM-структурах на основе оксида гафния
*Е. А. Ганыкина*
*А. А. Резванов*
*Е. С. Горнев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Anchor Structure Search Algorithm for SMO
*E. V. Sokolova*
*N. N. Balan*
799 Разработка алгоритма поиска якорной структуры для одновременной оптимизации источника освещения и маски
*Е. В. Соколова*
*Н. Н. Балан*

Designing an Automation Module for Calculating the Operating Mode of the Bipolar Transistor
*V. E. Ryabukhin*
801 Создание модуля автоматизации расчета режима работы биполярного транзистора
*В. Е. Рябухин*

Ultrafast Dynamics of Carriers in $MoS_2$ on $SiO_2$/Si Substrate
*E. D. Lebedeva*
*N. Y. Pimenov*
*K. A. Brekhov*
*S. D. Lavrov*
803 Сверхбыстрая динамика носителей заряда в $MoS_2$ на подложке $SiO_2$/Si
*Е. Д. Лебедева*
*Н. Ю. Пименов*
*К. А. Брехов*
*С. Д. Лавров*

Implementing the Wavelet Transform for Noise Filtering Based on Programmable Logic Schemes
*M. Y. Romashikhin*
*D. S. Potekhin*
805 Реализация вейвлет-преобразования для фильтрации шума на основе схем программируемой логики
*М. Ю. Ромашихин*
*Д. С. Потехин*

New Materials for Terahertz Photoconductive Antennas Based on Ternary Compounds of III-V Group Elements Formed as Superlattices
*F. A. Zainullin*
807 Новые материалы для терагерцевых фотопроводящих антенн на основе тройных соединений элементов III–V групп, сформированных в виде сверхрешеток
*Ф. А. Зайнуллин*

Flexible Booster RFID Microwave Inductive-coupled Tag
*N. V. Pomelov*
*A. Y. Reznik*
809 Гибкая бустерная RFID-метка СВЧ-диапазона с индуктивной связью
*Н. В. Помелов*
*А. Ю. Резник*

Research on the Influence of the Reticle Sidewall Angle Tilt on the Image Forming in Photolithography
*E. L. Kharchenko*
*N. N. Balan*
812 Исследование влияния угла наклона стенки фотошаблона на формирование изображения в фотолитографии
*Е. Л. Харченко*
*Н. Н. Балан*

Silicon Photonics Devices Simulation
*V. A. Budnyaev*
814 Моделирование устройств кремниевой фотоники
*В. А. Будняев*

False Errors Analysis in DRC Deck Regression Testing
*O. R. Zagidullina*
*A. S. Nadin*
817 Анализ «ложных» ошибок DRC при регрессионном тестировании командных файлов
*О. Р. Загидуллина*
*А. С. Надин*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Re-emitting Thin Films Based on Hybrid Organic Materials for Silicone Photoelectron Converters
*V. S. Gurchenko*
*A. S. Tyutyunik*
*A. I. Dmitriev*
*A. S.-A. Mazinov*
819 Переизлучающие тонкие пленки на основе гибридных органических материалов для кремниевых фотоэлектрических преобразователей
*В. С. Гурченко*
*А. С. Тютюник*
*А. И. Дмитриев*
*А. С.-А. Мазинов*

An Intelligent System for Analyzing and Evaluating Medical Images to Support Medical Decision-making
*D. V. Burdin*
*M. A. Rudenko*
821 Интеллектуальная система анализа и оценки медицинских изображений для поддержки принятия врачебных решений
*Д. В. Бурдин*
*М. А. Руденко*

Development and Approbation of the Method of Forming a Critical Set of Microcircuits Parameters
*A. A. Shabanov*
*M. G. Putrya*
823 Разработка и апробация методики формирования критической совокупности параметров микросхем
*А. А. Шабанов*
*М. Г. Путря*

Rad-Hard 12-bit Analog-to-Digital Converter Using Auto-Calibration Based on 180-nm SOI
*D. V. Kochetkov*
*E. O. Belousov*
*K. M. Molenkamp*
*A. V. Enns*
825 Радиационно стойкий 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с использованием автокалибровки на базе КНИ 180 нм
*Д. В. Кочетков*
*Е. О. Белоусов*
*К. М. Моленкамп*
*А. В. Эннс*

Method of Selecting Optical Model Parameters for Different Topological Configurations
*A. A. Utkina*
*E. L. Kharchenko*
828 Методика подбора оптимальных параметров оптической модели для различных топологических конфигураций
*А. А. Уткина*
*Е. Л. Харченко*

Impact of Well Edge Proximity Effect on Standard Cell Parameters
*O. R. Zagidullina*
*S. A. Korotkikh*
830 Оценка влияния геометрии области NWELL на характеристики стандартных ячеек
*О. Р. Загидуллина*
*С. А. Коротких*

Research and Analysis of Developed DET-Triggers Implementations
*M. A. Gorchakova*
832 Исследование и анализ разработанных реализаций DET-триггеров
*М. А. Горчакова*

Explaining the Shift of the Resonant Frequency of the Volumetric Short-circuited UHF Label in Contact with Metal
*I. V. Epov*
834 Обоснование факта сдвига резонансной частоты объемной короткозамкнутой UHF-метки при контакте с металлом
*И. В. Эпов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Research on Characteristics of Different Films at Different Angles of Rotation in Space
*M. M. Padalinskiy*
836 Исследование характеристик различных пленок при разных углах поворота в пространстве
*М. М. Падалинский*

Developing a Universal Digital Tester Based on FPGA
*A. K. Maksimov*
838 Разработка универсального цифрового тестера на основе ПЛИС
*А. К. Максимов*

Simulation of Post-plant Annealing of Nonstoichiometric $SiO_{1.7}$
*E. V. Okulich*
*V. I. Okulich*
*D. I. Tetelbaum*
*A. N. Mikhaylov*
840 Моделирование постимплантационного отжига нестехиометрического $SiO_{1.7}$
*Е. В. Окулич*
*В. И. Окулич*
*Д. И. Тетельбаум*
*А. Н. Михайлов*

Influence of Development Temperature on Edge Roughness of Exposed Lines in HSQ Resist
*A. V. Shishlyannikov*
*A. A. Tatarintsev*
*A. A. Sharapov*
842 Влияние температуры проявления на шероховатость края экспонируемых линий в HSQ-резисте
*А. В. Шишлянников*
*А. А. Татаринцев*
*А. А. Шарапов*

Research and Optimization of the Logical Element for FPGA Developed by 90 nm Technology
*Y. A. Makiyevsky*
845 Исследование и оптимизация логического элемента для ПЛИС, разработанного по технологии 90 нм
*Ю. А. Макиевский*

Developing a Microwave Comparator with a Latch at the Output in the BICMOS Technological Basis
*S. A. Kachura*
847 Разработка СВЧ-компаратора с защелкой на выходе в технологическом базисе БИКМОП
*С. А. Качура*

Developing Two-probe Spreading Resistance Profiler for Measuring Doping in Semiconductors
*A. V. Krasnov*
*M. V. Efanov*
*F. E. Olennikov*
849 Разработка установки для измерения профилей примесей в полупроводниках методом двухзондового измерения сопротивления растекания
*А. В. Краснов*
*М. В. Ефанов*
*Ф. Е. Оленников*

Relation Between Diffraction Grating Reflection Spectrum and Excited Mode Profile in Silicon-on-Insulator Waveguide
*R. T. Minnullin*
*M. Y. Barabanenkov*
851 Связь спектра отражения дифракционной решетки с профилем возбуждаемой моды в волноводе структуры «кремний на изоляторе»
*Р. Т. Миннуллин*
*М. Ю. Барабаненков*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Developing a Functional Verification Agent for the SAR ADC Controller Unit
*A. S. Strakhov*
*E. S. Vasilev*
*M. M. Solntsev*
854 Разработка агента функциональной верификации для схемы управления и доступа к АЦП последовательного приближения
*А. С. Страхов*
*Е. С. Васильев*
*М. М. Солнцев*

Trusted VLSI Design
*E. P. Pevtsov*
*T. A. Demenkova*
856 Доверенное проектирование интегральных схем
*Е. Ф. Певцов*
*Т. А. Деменкова*

FPGA Implementation of Radar Surface Observartion System
*K. A. Zinis*
*E. V. Varlamov*
860 Реализация радиолокационной системы зондирования поверхностей на ПЛИС
*К. А. Зинис*
*Е. В. Варламов*

One-dimensional Model of ZnO Nanorods Gas-phase Growth on Silicone Substrates
*A. A. Sharapov*
*I. V. Matyushkin*
862 Одномерная модель газофазного роста наностержней ZnO на кремниевых подложках
*А. А. Шарапов*
*И. В. Матюшкин*

Phenomenological Model for Directed Self-assembly Method
*M. V. Litavrin*
*E. S. Gornev*
*I. V. Matyushkin*
864 Феноменологическая модель для метода направленной самосборки
*М. В. Литаврин*
*Е. С. Горнев*
*И. В. Матюшкин*

Designing Digital Circuits with Multiple Clock Domains on the Example of Developing a Timer for a Modern Microcontroller
*V. D. Alexeev*
*E. S. Vasilev*
866 Проектирование цифровых схем с поддержкой нескольких тактовых сигналов на примере разработки таймера для современного микроконтроллера
*В. Д. Алексеев*
*Е. С. Васильев*

Research on Methods for Verifying the Quality of Spice Models of Submicron MOS
*A. M. Kriventsev*
*A. G. Potupchik*
*A. V. Shemyakin*
*A. E. Shamkhalov*
868 Исследование методов верификации качества SPICE-моделей субмикронных МОП-транзисторов
*А. М. Кривенцев*
*А. Г. Потупчик*
*А. В. Шемякин*
*А. Э. Шамхалов*

Simulation of Electric Field Distribution in Structure with a Memory Effect with a Porous Low-k Dielectric as a Buffer Layer
*A. A. Orlov*
*E. A. Ganykina*
*A. A. Rezvanov*
870 Моделирование распределения электрических полей в структуре с эффектом памяти с пористым low-k-диэлектриком в качестве буферного слоя
*А. А. Орлов*
*Е. А. Ганыкина*
*А. А. Резванов*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Investigation into Barrier Layers for the Formation of Transistor Structure Copper Contact Plugs
*S. A. Gorokhov*
*S. I. Patyukov*
*V. G. Plaksin*
872 Исследование барьерных слоев для формирования медных контактов к транзисторной структуре
*С. А. Горохов*
*С. И. Патюков*
*В. Г. Плаксин*

Solvent Impact on Properties of Liquid-phase Exfoliated $Bi_2Te_3$ Nanocrystals for Applications in Infrared Photonics
*N. A. Lavrentyev*
*A. E. Mirofyanchenko*
*E. V. Mirofianchenko*
*V. S. Popov*
875 Изучение влияния дисперсионной среды на процесс жидкофазной эксфолиации двумерных нанокристаллов $Bi_2Te_3$ для использования в датчиках ИК-диапазона спектра
*Н. А. Лаврентьев*
*А. Е. Мирофянченко*
*Е. В. Мирофянченко*
*В. С. Попов*

Theoretical and Experimental Study of Intrinsic Variability in Hafnium Oxide Based RRAM
*M. I. Fedotov*
*S. V. Koveshnikov*
878 Теоретическое и экспериментальное исследование невоспроизводимости параметров переключения в элементах резистивной памяти на основе оксида гафния
*М. И. Федотов*
*С. В. Ковешников*

Phased Array Integrated Beamformers Based on 180 nm SiGe BiCMOS Technology
*I. F. Filippov*
*Y. B. Gimpilevich*
*V. V. Vertegel*
880 Интегральные диаграммообразующие схемы фазированных антенных решеток на основе 180-нм SiGe БиКМОП-технологии
*И. Ф. Филиппов*
*Ю. Б. Гимпилевич*
*В. В. Вертегел*

Power Semiconductor Electronics and Microelectronics. Semiconductor Materials. Technologies. Component Base
*V. A. Kozlov*
882 Силовая полупроводниковая электроника и микроэлектроника: полупроводниковые материалы, технологии, компонентная база
*В. А. Козлов*

Metamaterial with High Dielectric Constant Based on Cylinders Between Conductive Layers
*M. Y. Larionov*
*A. S. Sobolev*
884 Метаматериал с высоким значением диэлектрической проницаемости на основе цилиндров между проводящими слоями
*М. Ю. Ларионов*
*А. С. Соболев*

Developing a Temperature Sensor Based on Transistors with Injection-Capacitive Coupling
*D. N. Ivanov*
*A. V. Leonov*
*V. N. Murashev*
886 Разработка датчика температуры на основе транзисторов с инжекционно-емкостной связью
*Д. Н. Иванов*
*А. В. Леонов*
*В. Н. Мурашев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Mathematical Modeling of Memristor Considering Temperature Increase in the Process of Resistance Switching
*S. E. Kuznetsov*
888
Математическое моделирование мемристора с учетом роста температуры в ходе резистивного переключения
*С. Е. Кузнецов*

Generic Photomask Specification for Critical Litho Layers of 28 nm Node
*N. N. Balan*
*V. V. Ivanov*
*A. L. Pankratov*
*E. L. Kharchenko*
890
Типовая оценочная спецификация на фотошаблоны критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 28 нм
*Н. Н. Балан*
*В. В. Иванов*
*А. Л. Панкратов*
*Е. Л. Харченко*

Analysing the Efficiency of Using Binary Neural Networks for Speech Recognition
*L. A. Moshkarova*
*O. A. Telminov*
892
Анализ эффективности применения бинарных нейронных сетей для распознавания речи
*Л. А. Мошкарова*
*О. А. Тельминов*

The Effect of Annealing on the Parameters of Schottky Barriers Based on $In_{0.52}Al_{0.48}As$ with Different Compositions of Metallization Layers
*I. Y. Genze*
*M. S. Aksenov*
*N. A. Valisheva*
894
Влияние отжига на параметры барьеров Шоттки на основе $In_{0.52}Al_{0.48}As$ с различным составом слоев металлизации
*И. Ю. Гензе*
*М. С. Аксенов*
*Н. А. Валишева*

Using Laser Systems in Materials Processing of the Microelectronic Industry
*O. S. Vasiliev*
896
Применение лазерных систем в вопросах обработки материалов микроэлектронной промышленности
*О. С. Васильев*

Influence of Quantum Transport of Charge Carriers on the High Frequency Conductivity of a Semiconductor Nanolayer
*O. V. Savenko*
*I. A. Kuznetsova*
898
Влияние квантового транспорта носителей заряда на высокочастотную электропроводность полупроводникового нанослоя
*О. В. Савенко*
*И. А. Кузнецова*

Influence of Heterogeneous Growth Stages on the Basic Characteristics of Layers
*V. L. Evdokimov*
900
Влияние стадий гетерогенного роста на базовые характеристики слоев
*В. Л. Евдокимов*

Probabilistic Evaluation of Combinational Logic Circuits Reliability
*N. V. Zheludkov*
*K. A. Petrov*
903
Вероятностная оценка сбоеустойчивости комбинационных логических схем
*Н. В. Желудков*
*К. А. Петров*

Methods of Positioning Laser Processes on the Processing Object
*A. A. Afoniushkin*
905
Методы позиционирования лазерных процессов на объекте обработки
*А. А. Афонюшкин*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Dynamics of an Excetptional Point in a System of Two Coupled Magnonic Waveguides
*O. S. Temnaya*
*D. V. Kalyabin*
*S. A. Nikitov*
907
Управление динамикой особой точки в системе связанных магнонных волноводов со сбалансированными затуханием и усилением
*О. С. Темная*
*Д. В. Калябин*
*С. А. Никитов*

Methods for Increasing the MDP Efficiency Within the Mask-Flow Software Package
*A. V. Kolobov*
*K. A. Medvedev*
910
Методы повышения эффективности процесса формирования фотошаблонов в рамках программного комплекса mask-flow
*А. В. Колобов*
*К. А. Медведев*

Estimating the Efficiency of Applying Various Industrial Extractors for Determining Spice Models Parameters of Submicron MOSFETs
*M. R. Ismail-Zade*
912
Оценка эффективности применения различных промышленных экстракторов для определения параметров SPICE-моделей субмикронных МОП-транзисторов
*М. Р. Исмаил-Заде*

Principles of Mask Data Preparation Flow Automation
*K. A. Medvedev*
*A. V. Kolobov*
*V. V. Ivanov*
914
Принципы автоматизации маршрутов проектирования фотошаблонов
*К. А. Медведев*
*А. В. Колобов*
*В. В. Иванов*

Sensor of Optical and Neutron Radiation Based on Electroluminescent Panel
*V. V. Urumov*
*I. N. Goncharov*
917
Датчик оптического и нейтронного излучения на основе электролюминесцентной панели
*В. В. Урумов*
*И. Н. Гончаров*

Selecting Parameters of a Quasi-periodic Interleaver Based on a Function Characterizing the Bit Diversity in the Time-Frequency Domain
*D. V. Khiteva*
*A. V. Kolobkov*
*K. V. Gorokhov*
920
Выбор параметров квазипериодического перемежителя на основе функции, характеризующей разнесение битов в частотно-временной области
*Д. В. Хитева*
*А. В. Колобков*
*К. В. Горохов*

Optical Characteristics of a Multilayer Structure with Lighted Films of Phase-change Materials
*E. M. Pritotskii*
*E. P. Yuzko*
*M. A. Pankov*
922
Оптические характеристики многослойной структуры с просветленными пленками фазоизменяемых материалов
*Е. М. Притоцкий*
*Е. П. Юзько*
*М. А. Панков*

Appearance of ELDRS in MNOS-Structure
*E. V. Mrozovskaya*
*P. A. Chubunov*
*G. I. Zebrev*
924
Проявление эффекта низкой интенсивности в МНОП-структуре
*Е. В. Мрозовская*
*П. А. Чубунов*
*Г. И. Зебрев*

# IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ


Investigation into High-pass Negative Group Delay RL-Circuits Characteristics
*B. Y. Tishchuk*
926 Исследование характеристик активно-индуктивных цепей с отрицательной групповой задержкой на верхних частотах
*Б. Ю. Тищук*

Influence of Native Point Defects on Electrical and Optical Properties of Wide-zone AB Compounds
*S. P. Kobeleva*
928 Влияние СТД на электрические и оптические свойства широкозонных соединений АВ
*С. П. Кобелева*

Class-G Power Amplifier for Infocommunication Systems
*E. V. Leontiev*
*A. S. Korotkov*
*Y. A. Matveev*
930 Усилитель мощности класса G для инфокоммуникационных систем
*Е. В. Леонтьев*
*А. С. Коротков*
*Ю. А. Матвеев*

Study of Opportunities for Integrating Coating Formation Processes for the 1D-2D Material Growth in CMOS Technology
*O. A. Telminov*
*E. S. Gornev*
*S. I. Yanovich*
*A. A. Sharapov*
*L. A. Moshkarova*
*M. V. Shakhmanova*
932 Исследование возможностей интеграции процессов формирования покрытий для выращивания 1D-2D-материалов с технологией КМОП
*О. А. Тельминов*
*Е. С. Горнев*
*С. И. Янович*
*А. А. Шарапов*
*Л. А. Мошкарова*
*М. В. Шахманова*

Navigation Method Based on the Analysis of the Sky Polarization Degree
*G. A. Karnup*
*A. M. Cherkasov*
935 Метод навигации, основанный на анализе степени поляризации небесного свода
*Г. А. Карнуп*
*А. М. Черкасов*

Fundamental Physical Limitations and Trends in Nanoelectronics Development
*K. Y. Arutyunov*
938 Фундаментальные физические ограничения и перспективы развития наноэлектроники
*К. Ю. Арутюнов*

Investigation into the Temperature Effect on the Radiation Failure Stability of CMOS Memory Cells with a Reduction of Transistor Sizes
*D. A. Popov*
*D. S. Silkin*
*A. O. Sultanov*
*A. R. Muhametdinova*
*B. I. Gallyamov*
940 Исследование влияния температуры на сбоеустойчивость КМОП-ячеек памяти с уменьшением размеров транзисторов
*Д. А. Попов*
*Д. С. Силкин*
*А. О. Султанов*
*А. Р. Мухаметдинова*
*Б. И. Галлямов*

Superconducting Spintronics — an Advanced Field of Cryogenic Nanoelectronics
*N. G. Pugach*
*D. V. Seleznyov*
943 Сверхпроводящая спинтроника — перспективное направление криогенной наноэлектроники
*Н. Г. Пугач*
*Д. В. Селезнев*

УДК 629.78 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.57.59

# Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ»

## Modes of the Local Navigation System Operation in the CONSUL Project. Consumers of the CONSUL System

**Корнеев И. Л., к. т. н., Кузнецов А. С., Королев В. С.**
*АО «НИИМА «Прогресс»*
*125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54*
*korneyev@mri-progress.ru, as.kuznetsov@mri-progress.ru, korolev@mri-progress.ru*

**Korneev I. L., Ph.D, Kuznetsov A. S., Korolev V. S.**
*Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC ("PROGRESS MRI" JSC)*
*54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia*
*korneyev@mri-progress.ru, as.kuznetsov@mri-progress.ru, korolev@mri-progress.ru*

Рассмотрена радионавигационная система «КОНСУЛ», создаваемая в НИИМА «Прогресс» на основе комплекта специализированных СБИС. Рассмотрены режимы работы и методы определения координат объектов. Приведены преимущества системы перед ближайшими аналогами. Рассмотрены сферы применения системы.
**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС); локальная система навигации; навигационные сигналы; радионавигационная опорная станция; абонентский терминал.

The paper considers the CONSUL radio navigation system, created at NIIMA "Progress" on the basis of a set of ASIC, as well as modes of operation and methods of determining the coordinates of objects. In addition, it presents the advantages of the system over the nearest analogues and the scope of the system application.
**Keywords:** global navigation satellite systems (GNSS); local navigation system; navigation signals; radio navigation reference station; subscriber terminal.

Локальные системы навигации дополняют глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) в условиях плохого приема или отсутствия сигналов ГНСС. ЛСН является основой разрабатываемой системы «КОНСУЛ», в которой комплексируются навигационные средства высокоточной ГНСС (в режиме RTK.PPP), инерциальной навигационной системы (ИНС), WiFi RTT и др. В создаваемой системе «КОНСУЛ» используется комплект СБИС, разработанный в НИИМА «Прогресс», состоящий из цифровой К1917ВС014 (ЦПП-ЛСН) и К5200МХ014 (РППУ-ЛСН) радиочасти.

В системе «КОНСУЛ» используются два режима определения координат объектов:

- запросный режим;
- беззапросный режим.

В запросном режиме абонентский терминал (АТ) излучает сигналы запроса, а радионавигационная опорная станция (РОС) принимает их и переизлучает как сигналы ответа. Переизлученные сигналы принимаются АТ. Так как скорость распространения радиоволн постоянна, то принятые в АТ ответные сигналы (РОС) запаздывают по отношению к излученным сигналам на определенное время: $t_з = 2r/c + t_{з\,обр}$ или $r = c \cdot (t_з - t_{зобр})/2$, где r — расстояние между АТ и РОС, c — скорость распространения радиоволн, $t_{зобр} = const$ — время задержки при приеме/передаче сигнала в АТ и РОС.

**Достоинства:** высокая точность, простота бортовой аппаратуры.

**Недостатки**: ограниченная пропускная способность, наличие дополнительного передатчика у абонента.

В беззапросном режиме в РОС и АТ устанавливаются согласованные друг с другом точные часы. На выходе этих часов в строго определенные моменты времени формируются метки времени $U_{оп}$. В РОС и АТ такие метки формируются в один и тот же момент времени. РОС излучает импульсный сигнал в момент формирования метки $U_{оп}$. На борту он будет спустя время $t_з = r/c$, где r — расстояние между РОС и АТ. Измерив в АТ временной интервал межу импульсом метки времени $U_{оп}$ и принятым импульсом в АТ, можно определить расстояние между РОС и АТ.

**Достоинства:** отсутствие передатчика у абонента, неограниченная пропускная способность.

**Недостатки:** потребность в использовании высокоточных генераторов (часов) меток времени. Особенный недостаток — синхронизация всех АТ с РОС с использованием точных часов. Для устранения этого недостатка были рассмотрены дальномерный и разностно-дальномерный методы. В разностно-дальномерном методе абоненту не надо знать момент передачи сигнала от РОС, а важно знать разницу времени прихода сигнала от разных РОС. При этом должна быть создана сеть синхронизированных опорных станций. В запросном режиме используется дальномерный метод. Для обеспечения требований различных потребителей в системе «КОНСУЛ» используются два метода определения местоположения: дальномерный и разностно-дальномерный (рис. 1).

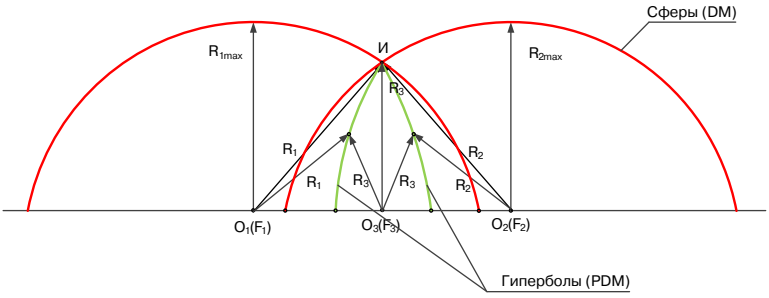



**Рис. 1.** Дальномерный и разностно-дальномерный методы

**Дальномерный метод решения навигационной задачи** заключается в определении местоположения абонента и измерении расстояний между АТ и РОС в точках О1, О2. Каждая поверхность положения представляет собой сферу с центром в РОС и радиусом, равным дальности. Так как точки И, О1, О2 находятся в одной плоскости, то поверхности положения переходят в окружности с точкой пересечения И (АТ). Имеется еще одна точка пересечения окружностей, но неоднозначность измерений можно исключить.

**Разностно-дальномерный метод решения навигационной задачи** требует наличия на плоскости двух пар РОС: О1, О3 и О2, О3. Одна из них обычно общая (О3). Каждая пара станций используется для получения линий позиционирования в виде гипербол с фокусами в опорных пунктах. Эти линии строятся как геометрические

места точек с постоянной разностью расстояний: R1 — R3 = const от О1 и О3; R2 — R3 = const от О2 и О3. Точка пересечения гипербол совпадает с объектом И (АТ).

Дальность действия ЛСН (Rmax) ограничивается радиогоризонтом, определяемым по приближенной формуле: $3{,}57\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ (км), где $h_1$ — высота антенны РОС (м), $h_2$ — антенны АТ (м).

**Сравнение методов**

**Дальномерный метод (ДМ):**

- можно работать по двум опорным станциям;
- опорные станции могут быть не синхронизированы;
- зона действия определяется мощностью передатчиков и прямой радиовидимостью;
- количество пользователей ограничено, так как используется запросный метод;
- для обеспечения высокой точности позиционирования и у абонентов, и на опорных станциях должны использоваться точные генераторы.

**Разностно-дальномерный метод (РДМ):**

- создается сеть РОС, состоящая из не менее чем трех станций;
- РОС должны быть синхронизированы с высокой точностью (цезиевые генераторы $10^{-11}$);
- количество пользователей не ограничено, так как есть синхронизированная сеть опорных станций;
- в абонентских терминалах могут использоваться недорогие кварцевые генераторы ($10^{-6}$).

**Основные сферы применения результатов проекта «КОНСУЛ»:**

- проводка морских судов в сложных условиях на подходах к портам;
- навигация и мониторинг высокоавтоматизированного транспорта на внутренних водных путях;
- навигация и мониторинг транспортных средств, персонала, грузов, техники в портах, доках, терминалах на территории транспортно-логистических центров;
- навигация карьерной техники, персонала;
- зоны рискованного земледелия для автоматизированного и беспилотного управления сельскохозяйственной техникой;
- навигация и мониторинг транспортных средств, персонала, грузов, техники в железнодорожной отрасли, на МЦК;
- навигация и мониторинг транспортных средств высокоавтоматизированного транспорта на федеральных трассах, М11, М12, ЦКАД;
- навигация беспилотных летательных аппаратов;
- применение в интеллектуальных транспортных системах.

Приведено с**равнение аппаратуры «КОНСУЛ»** с отечественными и зарубежными аналогами.

Существующие отечественные локальные радионавигационные системы высокой точности и ближайший зарубежный аналог — система UHRS (Locata) не обладают высокой помехоустойчивостью.

«КОНСУЛ» отличается более высокой устойчивостью к воздействию маскирующих и имитационных помех.

УДК 621.396.6 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.60.61

# Опыт применения отечественной элементной базы при проектировании аварийно-спасательной аппаратуры

## Experience in Applying a Domestic Elementary Base when Designing the Emergency Rescue Equipment

**Епифанов М. А.**
*Филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» — «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»*
*111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53*
*epifanov_ma@orkkniikp.ru*

**Yepifanov M. A.**

Рассмотрены основные характеристики аварийно-спасательной аппаратуры, ее КПА и пеленгаторов, варианты реализации на отечественных ЭРИ и возникающие при этом проблемы. Даны варианты решения, включая предложения в технические стандарты и спецификации КОСПАС-САРСАТ для представления в секретариат.

**Ключевые слова:** КОСПАС-САРСАТ; радиомаяк; спасание; пеленгатор; контрольно-проверочная аппаратура.

Абонентские терминалы (радиомаяки) КОСПАС-САРСАТ являются устройствами, с которыми непосредственно взаимодействуют конечные потребители системы, поэтому их качеству и процедурам сертификации уделяется пристальное внимание со стороны как отечественных, так и международных надзорных органов. В связи с вышеизложенным еще большие требования в части обеспечения технических характеристик предъявляются к контрольно-проверочной аппаратуре (КПА) и пеленгаторам радиомаяков, которыми оснащаются поисково-спасательные службы. Современные радиомаяки и КПА, представленные на рынке, практически полностью состоят из импортных ЭРИ, включая элементы, аналоги которых изготавливаются в России, по ряду причин.

Прежде всего при разработке и производстве радиомаяков КОСПАС-САРСАТ и КПА наиболее трудновыполнимыми при использовании отечественной ЭКБ являются следующие технические требования системы:

- длительность работы в условиях ограничений по массе и габаритам радиомаяка;
- краткосрочная, среднесрочная, долгосрочная стабильность несущей частоты в широком диапазоне температур;
- ЭИИМ АФУ;
- приемлемая цена для потребителя;
- тепловыделение поверхностей.

Вышеуказанные сложности, как правило, вызваны такими недостатками ЭРИ ОП по сравнению с импортными, как:

- высокое энергопотребление и, как следствие, тепловыделение;
- нестабильность параметров в различных условиях;

- низкая степень интеграции компонентов конечных функциональных узлов.

В ходе разработки аварийных радиомаяков (ТА КССПС-ОМ-М), КПА (ПАК ТА, ТестерСАТ) и пеленгаторов (КРОС РКТ) нового поколения разработчики филиала АО «ОРКК» — «НИИ КП» применяли современную и перспективную отечественную элементную базу, опыт использования которой показал ее пригодность и надежность, особенно в аварийных маяках. Отмечено, что на цену изделия помимо стоимости непосредственно комплектующих влияют трудоемкость монтажа и регулировки изделия, наличие дополнительных теплоотводящих элементов, которые также определяют пользовательские характеристики аппаратуры, что было принято во внимание, из-за чего ряд решений пришлось отклонить в целях недопущения превышения стоимости разработанных образцов после освоения их в серийном производстве по сравнению с ценами на аналогичные по назначению и условиям эксплуатации импортные изделия.

Следует сделать вывод, что применение отечественных ЭРИ в аварийных радиомаяках КОСПАС-САРСАТ, КПА и пеленгаторах возможно, тем не менее оно осложняется вышеперечисленными проблемами в коммерческом сегменте, которые могут привести к неконкурентоспособности конечной аппаратуры по сравнению с импортными аналогами как по цене, так и по техническим характеристикам. В то же время уже сегодня с высоким процентом использования отечественной элементной базы могут быть разработаны и изготовлены радиомаяки специального назначения и пеленгаторы, например, для авиационной и морской техники, а также КПА, предназначенная для эксплуатации в стационарных условиях, например лабораториях.

В целях формирования данного рынка помимо дальнейшей работы над устранением известных недостатков ЭРИ ОП необходимо внести ряд изменений в технические стандарты и спецификации КОСПАС-САРСАТ, подготовленные в ходе работы.

***Литература***

1. C/S T.001. Issue 4. Rev. 8, June 2021. Specification for Cospas-Sarsat 406 MHz distress beacons.

УДК 629.7.054.07 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.62.63

# Применение нейронных алгоритмов для навигации по видеоизображению

## Application of Neural Algorithms for Navigating Using Video Image

**Зинченко А. А., Новицкий Л. В.**
*ООО «Ваис-Техника»*
*305018, г. Курск, просп. Кулакова, 24*
*main@wisetech.pro*

**Zinchenko A. A., Novitskiy L. V.**

Разработан опытный образец системы для беспилотного летательного аппарата, использующийся как один из источников данных о географических координатах. Приведены функции опытного образца, возможности комплексирования с другими бортовыми источниками данных, раскрыта проблематика и преимущества системы.

**Ключевые слова:** нейросети; нейронные алгоритмы; навигация по видеоизображению; оптико-электронные системы.

Сегодня для определения собственных географических координат широко распространены радионавигационные системы (СНС, РСБН, VOR, DME и т. п.), спутниковые навигационные системы (ГЛОНАСС, GPS и т. д.), а также автономная навигация, основанная на инерциальных навигационных системах. Радионавигационные системы подвержены подавлению средствами РЭБ, а автономные системы не обладают требуемой точностью (их точность сейчас на уровне 1 мили за час полета). К тому же точные инерциальные системы, как правило, имеют большие габариты и вес, что в условиях применения на летательных аппаратах влияет на остающийся объем полезной нагрузки.

В данной ситуации ощутимую поддержку могут оказать оптико-электронные системы с функцией определения географических координат по данным датчика обзора подстилающей поверхности.

Применение оптико-электронной системы (ОЭС) с датчиками обзора подстилающей поверхности видимого диапазона и с нейросетевыми алгоритмами позволяет повысить надежность и точность определения местоположения летательного аппарата в зонах, где отсутствует или нестабильно покрытие систем радионавигации и спутниковой навигации. Особенно актуально применение таких систем в БЛА, так как их системы автоматического управления крайне чувствительны к наличию данных о географическом положении. Предложенный и реализованный метод решения задачи поиска местоположения основан на применении сверточных нейронных сетей для обработки изображений с обзорного датчика и формирования входных данных для формальных методов расчета координат.

Основным ограничением применения оптико-электронных систем для задач навигации являются:

- погодные условия, влияющие на видимость подстилающей поверхности,
- местность, не обладающая какими-либо ориентирами,
- качество опорной картографической информации.

Применение нейросетевых алгоритмов позволяет снизить влияние атмосферных явлений на стабильность и точность работы системы. Также такой подход позволяет применять картографическую информацию различного типа в качестве опорных данных для расчетов.

Нейросетевой алгоритм в составе системы решает следующие задачи:

- сегментирование изображения, получаемого с датчиков системы, в формат, близкий к типу опорной карты;
- поиск уникальных объектов в зоне видимости датчиков системы;
- определение зон затенений поверхности, вызванных облачностью или другими атмосферными явлениями.

Окончательный расчет географических координат выполняется формальными методами.

В результате применения описанного метода построен опытный образец системы для беспилотного летательного аппарата, использующийся как один из источников данных о географических координатах. Совместное ее применение с системами радионавигации и ИНС позволит обеспечить резервирование, взаимный контроль источников данных, что повысит безопасность и расширит применимость авиационного комплекса в различных условиях.

УДК 621.396.621 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.64.65

# Исследование применения метода полосовой дискретизации для построения аппаратуры потребителей ГНСС

## Evaluating the Undersampling-based Front End for the GNSS Receivers

**Клименко М. Ю.**
*ЗАО НТЦ «Модуль»*
*125190, г. Москва, 4-я ул. 8 марта, 3*
*m.klimenko@module.ru*

**Klimenko M. Yu.**
*RC Module JSC*
*3 Eighth March 4th St., Moscow, 125190*
*m.klimenko@module.ru*

В статье рассмотрено использование принципа полосовой дискретизации в аналоговом тракте приемников ГНСС, произведено сравнение принимаемых сигналов, полностью реализован приемник ГНСС и проведено исследование по сравнению с традиционной схемой построения аналоговых трактов.
**Ключевые слова:** ГЛОНАСС; ГНСС; GPS; АЦП; субдискретизация.

This article describes the undersampling-based approach for the radiofrequency front-end of the GNSS receivers. The comparison with the traditional homodyne front end chip has been made, the GNSS receiver has been completely implemented and an experiment has been carried out in the standalone positioning mode.
**Keywords:** GLONASS; GNSS; GPS; ADC; undersampling.

В настоящее время приемники глобальных навигационных спутниковых систем стали неотъемлемой частью человеческой жизнедеятельности и многих сфер, которые, на первый взгляд, не зависят от информации о местоположении и точном времени, такие как банковская сфера, телекоммуникации и энергетика. В связи с расширением сфер применения навигационной аппаратуры потребителей возрастают и требования к приемникам, в том числе к их микроминиатюризации. Одним из способов уменьшения энергопотребления и габаритов устройств может являться применение метода полосовой дискретизации в качестве альтернативы традиционным аналоговым трактам, построенным на основе квадратурных смесителей.

Современные аналоговые тракты навигационных приемников осуществляют усиление принятого сигнала, его фильтрацию, перенос спектра на промежуточную частоту с применением квадратурных смесителей, а также дополнительную фильтрацию и усиление для последующей работы АЦП. Использование смесителей связано с множеством факторов, приводящих к искажениям сигнала и уменьшению точности позиционирования. Эффект наложения (*aliasing* в англоязычной литературе) позволяет использовать АЦП, работающий в верхних зонах Найквиста, в качестве идеального смесителя, лишенного недостатков традиционных схем.

В результате экспериментальных исследований, проведенных на микросхеме 1879ВЯ1Я [1], было установлено уменьшение СКО координат до 30 % и увеличение

среднего отношения сигнал/шум на 0,5–1 дБ. Потенциальной сложностью применения этого метода является необходимость реализации значительного усиления на радиочастоте и соответствующей изоляции, однако современные работы указывают на реализуемость подобных каскадов усиления на дискретных элементах [2].

***Литература***

1. Микросхема интегральная 1879ВЯ1Я. Руководство по эксплуатации, ЮФКВ.431268.006РЭ 2014. URL: https://www.module.ru/uploads/products/18791-479ac70798.pdf (дата обращения: 05.06.2021).
2. Васин М., Марущенко Д., Шемшур С. Экспериментальное исследование развязки между микрополосками // Современная электроника, 06, 2017. — С. 92–94.

Currently, GNSS receivers have become an essential part of modern life in many areas, such as banking, telecommunications, transport and energy. It leads to the increasing requirements for GNSS receivers, especially in terms of size. One of the ways of reducing the size and power consumption of the receivers is the undersampling-based approach for the analog front ends as an alternative to the traditional homodyne approach.

Modern RF front ends amplify the received signal, filter it and translate to the intermediate frequency using IQ mixers, followed up by an additional filtering and amplification stages to meet the requirements of the ADC. IQ mixers come with a bunch of error sources leading to position miscalculation. Spectrum aliasing effect allows utilization of the ADC sampling in the higher Nyquist zones as an equivalent of a “perfect” mixer, not having the disadvantages of the traditional mixers.

Experiments have been carried out using the BBP SoC [1], resulting in decrease of the standard deviation of the positions up to 30 % and increase of the mean signal-to-noise ratio up to 1 dB. A potential difficulty of implementing this method lies in the need of a massive RF amplification and appropriate signal isolation, however, modern articles indicate the possibility of the high PCB signal isolation and, therefore, amplification [2].

***References***

1. BBP SoC, User manual, ЮФКВ.431268.006РЭ 2014. URL: https://www.module.ru/uploads/products/18791-479ac70798.pdf.
2. Vasin M., Maruschenko D., Shemshur S. Experimental research on the microstrip isolation // Modern electronics, 06, 2017. P. 92–94.

УДК 621.396 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.66.67

# Исследование вопросов эффективной организации сети спутниковой связи на базе космических аппаратов HTS-класса с многолучевыми антеннами

## Research on the Effective Organization of a Satellite Communication Network Based on HTS-Class Spacecraft with Multi-beam Antennas

**Себекин Г. В., Маков С. В., Афонин А. А.**
*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Sebekin G. V., Makov S. V., Afonin A. A.**
*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

Рассмотрен вопрос управления пропускной способностью в перспективных сетях спутниковой связи на базе космических аппаратов HTS-класса с многолучевыми антеннами. Разработано программное обеспечение для выбора оптимальных решений по распределению абонентских терминалов в данных сетях.
**Ключевые слова:** спутниковые сети связи; спутники класса HTS; управление пропускной способностью.

The paper considers the issue of bandwidth control in promising satellite communication networks based on HTS-class spacecraft with multi-beam antennas. Software has been developed for the selection of optimal solutions for the distribution of subscriber terminals in these networks.
**Keywords:** satellite communication networks; HTS-class satellites; bandwidth control.

Одним из наиболее перспективных направлений развития систем спутниковой связи является создание сетей связи на базе космических аппаратов (КА) класса HTS. В таких КА бортовая антенна формирует большое количество остронаправленных лучей, накрывающих всю подспутниковую область, что позволяет повысить энергетику радиолинии и за счет этого либо обеспечить высокоскоростную передачу данных, либо на низких скоростях обслуживать малогабаритные абонентские терминалы (АТ). В настоящее время способы организации таких сетей и методы управления ими разработаны недостаточно полно, что делает тему настоящего доклада актуальной.

Рассматривается сеть, в которой низкоскоростные АТ (например шлюзы LPWAN — спутниковые каналы), имеющие различные потребности в пропускной способности каналов, размещены в достаточно большом регионе, территория которого обслуживается одним или несколькими КА класса HTS. При этом каждый АТ может находиться в зоне обслуживания одного или нескольких КА, а также на территории одной или нескольких локальных зон (ЛЗ) обслуживания лучей каждого из этих КА. Ресурс пропускной способности КА для обслуживания ЛЗ может выделяться дискретными порциями, а весовые коэффициенты (например, стоимости аренды) порции ресурса разных КА могут отличаться. Задача состоит в нахождении такого распределения АТ между КА и ЛЗ, которое минимизирует затраты ресурса на обслуживание сети.

Выполнена формальная постановка задачи минимизации затрат требуемого ресурса каналов ретрансляции в виде задачи дискретного программирования, получены соотношения для расчета целевой функции и ограничений на возможные отнесения АТ на обслуживание отдельными КА в различных ЛЗ. Проведена оценка сложности решения данной задачи и показано, что она является NP-трудной. Рассмотрены возможности ее решения на основе применения методов прямого перебора, ветвей и границ, а также динамического программирования. Для перечисленных методов охарактеризованы области их эффективного использования. Метод ветвей и границ позволяет отсечь неэффективные варианты при их упорядочении в виде дерева. Возможность применения метода динамического программирования обусловлена тем обстоятельством, что если оптимальное распределение АТ на всем множестве зон найдено, то внутри любого подмножества зон отнесенные к ним точки также должны быть распределены оптимально.

Разработано программное обеспечение, реализующее выбор оптимальных решений по распределению АТ между КА и ЛЗ. Приводятся примеры получения таких распределений.

One of the most promising areas of development of satellite communication systems is the creation of communication networks based on spacecraft (SC) of the HTS class. In such SC, the on-board antenna forms a large number of highly directional beams covering the entire sub-satellite region, which makes it possible to increase the energy of the radio link and thereby provide either high-speed data transmission or at low speeds serve small-sized subscriber terminals (ST). At present, the methods of organizing such networks and methods of managing them are not fully developed, which makes the topic of this report relevant.

A network has been considered in which low-speed ST (for example, gateways LPWAN-satellite channels), having different needs for channel bandwidth, are located in a sufficiently large region, whose territory is served by one or more HTS class satellites. In this case, each ST can be located in the service area of one or several SC, as well as on the territory of one or several local zones (LZ) for the beams of each of these SC. The resource of the SC throughput for servicing the LZ can be allocated in discrete portions, and the weighting factors (for example, the rental cost) of the portions of the resource of different SC can differ. The task is to find such a distribution of ST between the SC and the LZ, which minimizes the resource consumption for network maintenance.

The task of minimizing the costs of the required resource of the relay channels in the form of a discrete programming problem has been formulate, relations have been obtained for calculating the objective function and restrictions on the possible assignment of ST to servicing individual SC in different LZ. The complexity of solving this problem has been estimated and it has been shown that it is NP-hard. The possibilities of its solution have been considered based on the use of direct enumeration methods, branches and bounds, as well as dynamic programming. For the listed methods, the areas of their effective use have been characterized. The branch-and-bound method allows you to cut off inefficient options when arranged in a tree. The possibility of using the dynamic programming method is due to the fact that if the optimal distribution of ST on the entire set of zones is found, then within any subset of zones the points assigned to them should also be distributed optimally.

Software has been developed that implements the choice of optimal solutions for the distribution of ST between the SC and the LZ. Examples of obtaining such distributions have been given.

УДК 621.372.63 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.68.71

# Термостабильные фильтры на ПАВ с повышенной избирательностью для навигационно-связного оборудования и модулей

## Temperature Compensated SAW Filters with Increased Selectivity for Navigation and Communication Equipment and Modules

**Машинин О. В., Дорофеева С. С., Синицына Т. В.**
*ООО «БУТИС»*
*109316, г. Москва, Волгоградский просп, 42, корп. 5*
*mashinin.butis@gmail.com*

**Mashinin O. V., Dorofeeva S. S., Sinitsina T. V.**
*"BUTIS" Ltd*
*Moscow, 109316, Russia*
*mashinin.butis@gmail.com*

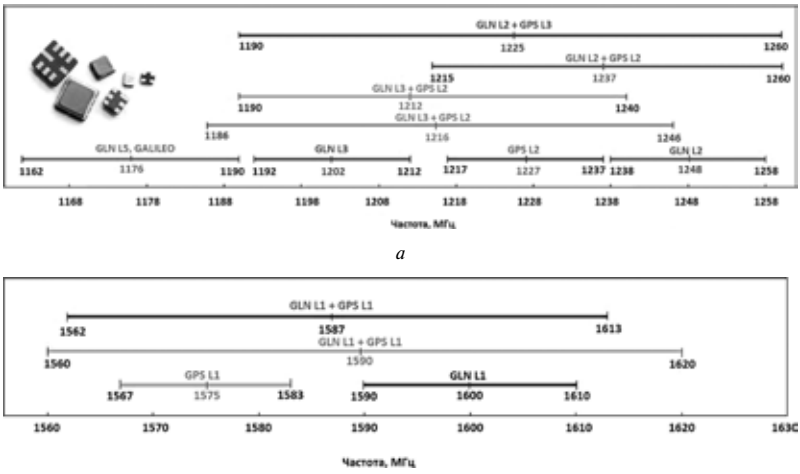
Рассмотрены методы термокомпенсации устройств на поверхностных акустических волнах, приведены результаты исследований термокомпенсированных фильтров на основе многослойных структур $LiTaO_3$/кремний для навигационно-связного оборудования стандарта GPS и ГЛОНАСС (диапазон L1).
**Ключевые слова:** поверхностная акустическая волна (ПАВ); термокомпенсированные пластины; пьезоэлектрический фильтр; температурный коэффициент частоты.

This paper is concerned with the methods of temperature compensation of devices based on surface acoustic waves. The results of investigation of temperature compensated filters based on multilayer $LiTaO_3$/silicon structures for navigation-communication equipment of GPS and GLONASS standards (L1 band) are presented.
**Keywords:** surface acoustic wave (SAW); temperature compensated wafers; piezoelectric filter; temperature coefficient of frequency.

Современный индустриальный мир невозможно представить без использования многофункциональных навигационных спутниковых систем, в значительной степени определяющих качество управления любым видом транспортных средств, а именно точное определение местоположения для воздушных, сухопутных и морских пользователей. В настоящее время в России в целях обеспечения наиболее полного охвата пользователей используется совмещенная система навигации ГЛОНАСС — GPS — GALILEO, план частотного распределения которой показан на рис. 1.

Благодаря уникальной совокупности параметров и высокой надежности частотная фильтрация в таких системах обеспечивается за счет применения пьезоэлектрических фильтров, выполненных по технологии поверхностных акустических волн (ПАВ). Конструктивной основой данных фильтров является пьезоэлектрическая подложка тантала лития с кристаллографической ориентацией *YXl*/42°. Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) данного пьезоматериала составляет порядка $40 \cdot 10^{-6}$ ед/град. Если при этом существует требование по подавлению паразитной помехи вблизи или в пределах переходной области фильтра,

то реализация такого фильтра стандартными методами становится невозможной. В качестве примера на рис. 2 приведена характеристика охватывающего ПАВ-фильтра стандарта GLNL21+GPSL1 на номинальную частоту 1587 МГц с шириной полосы пропускания 51 МГц (точки — заданные требования на фильтр). Из графика видно, что задача подавления помехи на частоте 1626 МГц (что соответствует началу разрешенного частотного диапазона для абонентских земных станций подвижной спутниковой системы «Турайя») хотя бы на 18 дБ от уровня основного сигнала не имеет решения.




*а*

*б*

**Рис. 1.** Распределение частот и полос пропускания для наземных радиоприемных устройств совмещенной навигационной системы ГЛОНАСС-GPS-GALILEO: *а*) диапазоны L2, L3 и L5; *б*) диапазон L1

Возможным вариантом решения в данном случае является использование так называемых термокомпенсированных ПАВ-фильтров, реализованных на основе многослойных структур $SiO_2$ / пьезоэлектрическая подложка (рис. 3*а*) либо пьезоэлектрическая пленка / кремний (рис. 3*б*), применение которых позволяет уменьшить в 3-4 раза величину ТКЧ от исходных значений.

Проведенный в ООО «БУТИС» комплекс исследований на основе второго метода (рис. 3*б*) позволил создать уникальную базовую конструкцию ПАВ-фильтра, применение которой позволило решить указанную выше проблему (ТКЧ = $-15 \cdot 10^{-6}$ ед/град), рис. 4.

Таким образом, разработанное конструктивно-технологическое решение показало высокую эффективность и может быть с успехом использовано при разработке ПАВ-фильтров нового поколения для навигационно-связного оборудования и модулей.

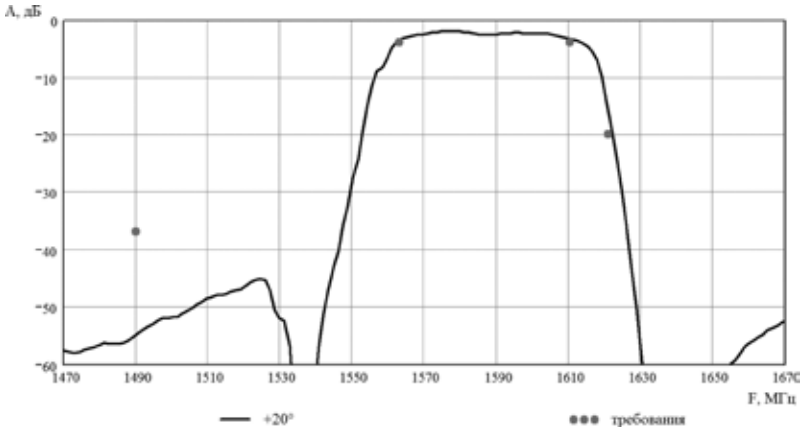
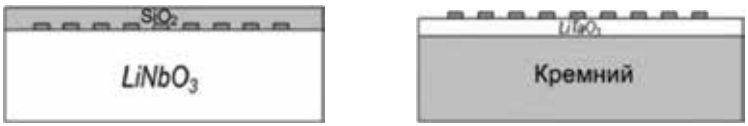



**Рис. 2.** Амплитудно-частотная характеристика охватывающего ПАВ-фильтра стандарта GLNL21+GPSL1 на номинальную частоту 1587 МГц на основе *YXl*/42° среза танталата лития




*а* *б*

**Рис. 3.** Термокомпенсированные ПАВ-фильтры на основе многослойных структур

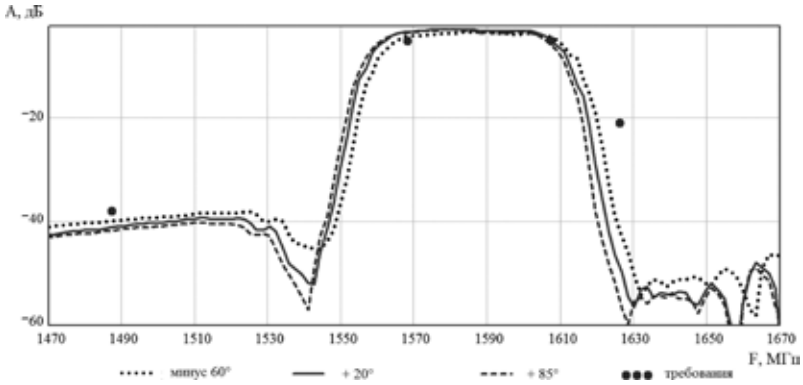



**Рис. 4.** Амплитудно-частотная характеристика охватывающего ПАВ-фильтра стандарта GLNL21+GPSL1 на номинальную частоту 1587 МГц на основе многослойной структуры *YXl*/42°$LiTaO_3$/кремний

The modern industrial world cannot be imagined without the use of multifunctional navigation satellite systems, which largely determine the quality of control of any type of vehicle, namely, accurate positioning for air, land and sea users. At present a combined navigation system GLONASS-GPS-GALILEO is used in Russia in order to ensure the most complete coverage of users. The frequency distribution plan of GLONASS-GPS-GALILEO navigation system is shown in Fig. 1.

Due to the unique set of parameters and high reliability, frequency filtration in such systems is ensured through the use of piezoelectric filters made using surface acoustic waves (SAW) technology. The constructive basis of these filters is a piezoelectric lithium tantalum wafer with a *YXl*/42° crystallographic orientation. The temperature coefficient of frequency (TCF) of this piezoelectric material is about −40 ppm. If there is a requirement to suppress parasitic interference near or within the transition region of the filter, then the implementation of such a filter by standard methods becomes impossible. For example, Fig. 2 shows the characteristic of an SAW filter of the GLNL21 + GPSL1 standard at a nominal frequency of 1587 MHz with a bandwidth of 51 MHz (the points are specified filter requirements). The graph shows that the problem of suppressing interference at a frequency of 1626 MHz (corresponding to the beginning of the permitted frequency range for subscribers of earth-based stations of the "Turaya" mobile satellite system) by at least 18 dB from the level of the main signal has no solution.

A possible solution in this case is the use of temperature compensated SAW filters, implemented on the basis of multilayer structures $SiO_2$ / piezoelectric substrate (Fig. 3*a*) or bonded wafers like piezoelectric film / silicon (Fig. 3*b*). These methods make it possible to reduce the TCF by a fraction of 3–4 from the original values.

The complex of studies conducted at BUTIS Ltd. on the basis of the second method (Fig. 3*b*) allowed us to create a unique basic design of a SAW filter, the use of which made it possible to solve the above problem (TCF = −15 ppm), Fig. 4.

Thus, the developed constructive-technological solution has shown high efficiency and can be successfully used in the development of new generation SAW filters for navigation and communication equipment and modules.

УДК 621.37 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.72.73

# Проектирование семейства микроконтроллеров для применения в системах идентификации, хранения и аутентификации в государственном и коммерческом секторе

## Designing a Family of Microcontrollers for Public and Commercial Identification, Storage and Authentication

**Лебедев А. В.**[1]
[1]*ООО «НМ-Тех»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, помещение XII, офис 4, 4а*

**Lebedev A. V.**[1]
[1] *NM-Teh JSC*
*office 4, 4a, room XII, floor 1, 6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527*

В докладе производится попытка обоснования разработки единой микропроцессорной платформы для применения в системах идентификации, хранения и аутентификации в государственном и коммерческом секторе.
**Ключевые слова:** микропроцессор; аутентификация; идентификация.

The article attempts to justify the development of a single microprocessor platform for identification, storage and authentication systems in the public and commercial sectors.
**Keywords:** microcontroller; authentication; identification.

В настоящее время происходит автоматизация различных услуг и документов. Происходит переход от использования бумажных документов к использованию электронных документов или документов, содержащих защищенный чип, который может хранить как информацию о человеке (его персональные данные), так и некие коммерческие данные.

В качестве защищенного чипа в этих документах используются однокристальные защищенные микроконтроллеры [1].

Любой защищенный микроконтроллер состоит из микропроцессорного ядра, коммуникационных интерфейсов, энергонезависимой памяти и элементов защиты.

При этом используется большое многообразие как микропроцессорных ядер, начиная от ядер собственной разработки и заканчивая ядрами известных мировых вендеров, так и других IP-блоков, что приводит к разработке нового программного обеспечения.

Одной из главных целей является разработка универсальной платформы, которую за счет масштабируемости (добавления дополнительных блоков) и реконфигурации (уменьшения или увеличения объема энергонезависимой памяти [2]) можно использовать в различных государственных и коммерческих проектах, таких как сим-карты, паспортно-визовые документы, e-token, удостоверения личности, смарт-карты для СКУД.

***Литература***

1. Лебедев А. В. Нападения на биометрическую информацию в микросхемах и методы защиты // Системы безопасности, 2018. — № 5. — С. 91–94.
2. Cao Zigui, Sun Ling, Lee Elton, Characterization of the Triple-Gate Flash Memory Endurance Degradation Mechanism // Chinese Journal of Semiconductors, 2009. Vol. 30. Issue 1, article id. 014003, P. 4.

Various services and documents are currently being automated. There is a transition from the use of paper documents to the use of electronic documents or documents containing a secure chip, which can store both information about a person (his personal data) and some commercial data.

As a secure chip, these documents use single-chip protected microcontrollers.

Any protected microcontroller consists of a microprocessor core, communication interfaces, non-volatile memory and security elements [1].

A large variety of both microprocessor cores, ranging from proprietary cores to cores of known world wenders, and other IP blocks, are being used, which leads to the development of new software.

One of the main goals is the development of a universal platform, which, due to scalability and reconfiguration (reduced or increased non-volatile memory[2]), cab be used in various government and commercial projects, such as: SIM cards, passport and visa documents, e-token, identity cards, in smart cards for MCUD.

***References***

1. Lebedev A. V. Attacks on biometric information in chips and protection methods // System of protection, 2018. № 5. P. 91–94.
2. Cao Zigui, Sun Ling, Lee Elton, Characterization of the Triple-Gate Flash Memory Endurance Degradation Mechanism // Chinese Journal of Semiconductors, 2009. Vol. 30. Issue 1, article id. 014003, P. 4.

УДК 007.51 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.74.75

# ПАК защиты информации в Интернете вещей с использованием российской криптографии

## Hardware-based Solution for Information Security in the Internet of Things Using Russian Cryptography

**Самойлов А. А., Сергеев В. Л.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*asamoylov@niime.ru*

**Samoylov A. A., Sergeev V. L.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*asamoylov@niime.ru*

Разработан и произведен программно-аппаратный комплекс для криптографической защиты информации в Интернете вещей на основе коммуникационного протокола прикладного уровня с использованием современных российских криптографических алгоритмов, реализованных в микросхемах первого уровня.
**Ключевые слова:** Интернет вещей; защита информации; российская криптография; микросхема первого уровня.

Questions of cybersecurity are extremely significant in the internet of things, especially in critical infrastructure. “MERI” JSC has developed a hardware-based solution to enhance reliability and safety of the internet of things to ease the technology implementation in areas where information security is obligatory. This solution uses Russian cryptographic algorithms and the first level microchip.
**Keywords:** internet of things; information security; Russian cryptography; first level microchip.

Интернет вещей — технологичная многоаспектная и стремительно растущая область, одним из вопросов развития которой является криптографическая защита информации. Характерными особенностями Интернета вещей в разрезе защиты информации являются:

- сегментированность каналов связи и обилие конфигураций [1],
- низкое энергопотребление и компактные габариты конечных устройств,
- малый объем передаваемой информации,
- большое число конечных устройств.

Разработанный и произведенный в АО «НИИМЭ» программно-аппаратный комплекс «Звезда» учитывает все эти особенности. Он состоит из:

1) микросхемы, интегрируемой в конечные устройства,
2) криптографического сервера, обеспечивающего управление системой,
3) аппаратного модуля безопасности сервера на основе кластера криптографических микросхем.

Для организации взаимодействия между конечными устройствами и криптографическим сервером используется рекомендованный ТК26 протокол

прикладного уровня CRISP, разработанный с учетом специфики Интернета вещей [2].

Микросхемы, входящие в состав ПАК «Звезда», отвечают требованиям, предъявляемым к СКЗИ класса КС3, и являются микросхемами первого уровня, т. е. разработанными и произведенными в России, что позволяет использовать решение в критической инфраструктуре.

ПАК «Звезда» поддерживает современные российские криптографические алгоритмы — ГОСТ Р34.10-12, ГОСТ Р34.11-12, ГОСТ Р34.12-15, с помощью которых обеспечиваются целостность, аутентичность и конфиденциальность передаваемых данных. Для проверки подлинности сообщений передаваемые данные могут быть подписаны при помощи электронной подписи.

Управление ключами на конечных устройствах осуществляется наиболее безопасным методом — удаленно, с использованием инфраструктуры открытых ключей, что избавляет от необходимости периодической физической замены микросхемы.

***Литература***

1. Михайлов В. Ю., Котляров Е. Ю., Зубов И. А., Нуйкин А. В., Кравцов А. С. Аспекты проектирования приемо-передающего устройства «Интернета вещей» // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2019. — Т. 3. — № 180. — С. 43–57.
2. Р 1323565.1.029-2019. Протокол защищенного обмена для индустриальных систем.

УДК 004.087.5 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.76.78

# Развитие защищенной аппаратной платформы NE32 на базе архитектуры RISC-V для применения в составе доверенных микроконтроллеров

## Developing a Secure NE32 Hardware Platform Based on RISC-V Architecture for Use as Part of Trusted Microcontrollers

**Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Васильев Е. С., Гордиенко А. В.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*anuykin@niime.ru*

**Nuykin A. V., Kravtsov A. S., Vasilev E. S., Gordienko A. V.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*anuykin@niime.ru*

В статье рассматриваются разработки АО «НИИМЭ» на базе процессорной архитектуры RISC-V. NE32 — это новая защищенная аппаратная платформа для реализации проектов микроконтроллера со сверхнизким потреблением, микроконтроллера для SIM-карт, микроконтроллера для идентификационных документов и банковских карт, модуля безопасности для Интернета вещей и др.
**Ключевые слова:** микроконтроллер; RISC-V; NE32; IP-блок; доверенная платформа; СКЗИ; Интернет вещей.

This paper presents the projects of MERI JSC based on the open processor RISC-V architecture. NE32 is a new secure hardware platform for the implementation of projects of a microcontroller with ultra-low consumption, a microcontroller for SIM cards, a microcontroller for identification documents and bank cards, a security module for the Internet of things, etc.
**Keywords:** microcontroller; RISC-V; NE32; IP; TPM; IoT.

В 2007 году в России было открыто самое передовое производство интегральных схем с топологическим уровнем 180 нм EEPROM. Россия совершила мощный рывок, сократив десятилетия технологического отставания от ведущих стран — производителей электроники. В числе первых разработок — СБИС для электронных паспортов и социальных карт, бесконтактных RFID-билетов. С 2014 г. разработанная АО «НИИМЭ» линейка микроконтроллеров MIK51 используется для массовых изделий различного назначения: паспортно-визовых документов, банковских карт, персональных электронных карт военнослужащего, полисов медицинского страхования [1–3].

В 2019 году в АО «НИИМЭ» начались работы по миграции разработанного семейства доверенных микроконтроллеров MIK51 на открытую процессорную архитектуру RISC-V [4]. NE32 — это новая защищенная универсальная аппаратная платформа, построенная на базе модифицированного процессорного ядра SCR1. В настоящий момент на базе платформы NE32 находятся в стадии реализации проекты универсального микроконтроллера со сверхнизким потреблением, микроконтроллера для SIM-карт, микроконтроллера для идентификационных документов и банковских карт, модуля безопасности для Интернета вещей и др.

32-битное ядро RISC-V обладает следующим поддерживаемым набором расширений: RV32I|E[MC]. Это означает поддержку целочисленных операций с 32-битными операндами с возможностью аппаратного конфигурирования для уменьшения количества внутренних регистров, поддержку сжатых инструкций, целочисленного умножения и деления. Количество эквивалентных вентилей 32-битного ядра RISC-V близко к количеству вентилей сверхкомпактных зарубежных ядер ARM Cortex-M0 и Cortex-M0+ (12 тыс. вентилей в минимальной конфигурации), а по производительности данное ядро превосходит ARM Cortex-M0.

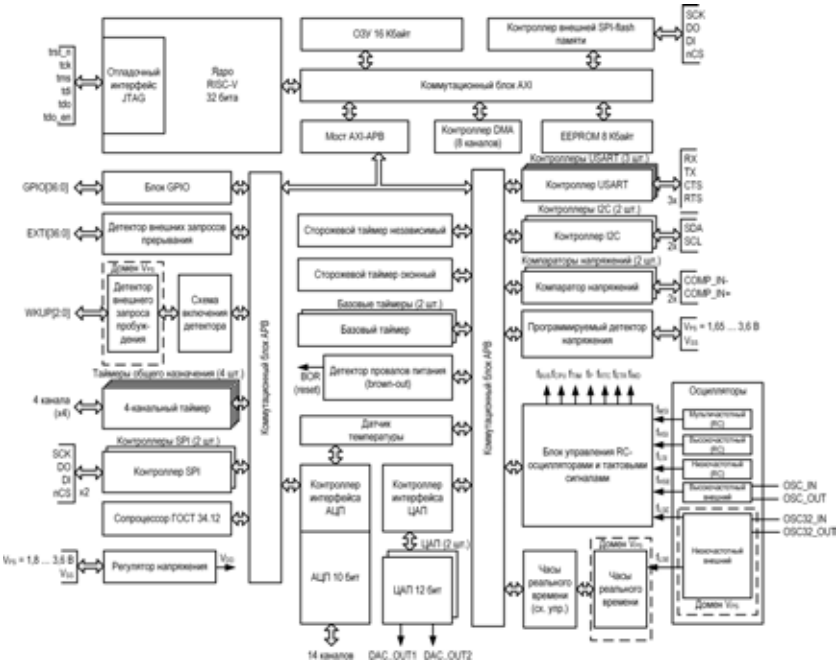



**Рис. 1.** Структурная схема универсального доверенного 32-разрядного микроконтроллера со сверхнизким потреблением

На текущий момент разработанные проекты защищенных микроконтроллеров реализованы в составе ПЛИС на базе отладочной платы Digilent Nexys-4 и могут быть переданы заказчикам для ознакомления вместе с комплектом средств разработки, который включает в себя графическую среду разработки, тулчейн RISC-V, отладчик на основе GDB с возможностью задания breakpoint и пошагового исполнения инструкций, программный стек openOCD для подключения аппаратного отладочного модуля.

Отдельно стоит отметить, что в составе микросхем будет использоваться физический датчик случайных чисел, который был сертифицирован Центром защиты информации и специальной связи ФСБ России по уровню КБ в составе интегральных микросхем первого уровня MIK51AD144D (K5016BK02H4) в 2019 году

и в составе NE51MOD01 (K5016BK03) в 2021 году по уровню КС3 в составе микросхем MIK51SC72D и MIK51AB144D [5].

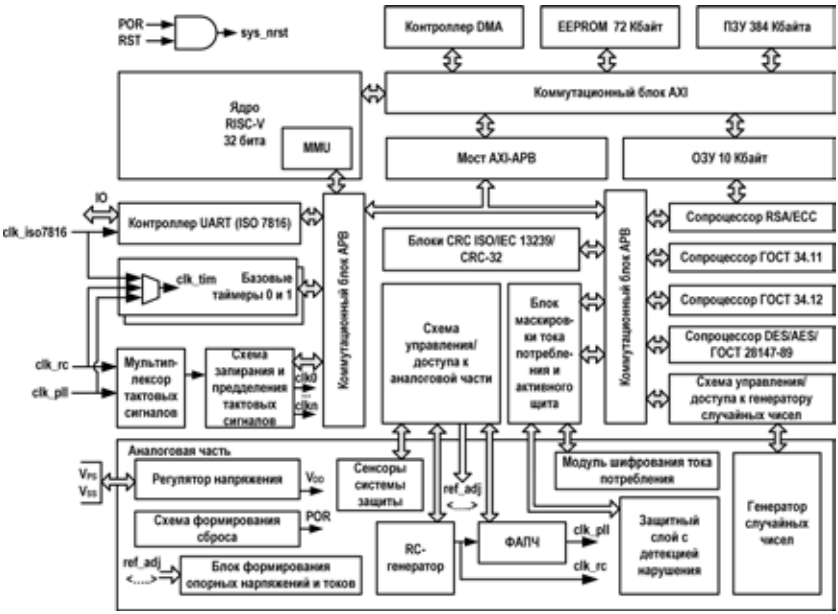



**Рис. 2.** Структурная схема защищенного микроконтроллера для SIM-карт

***Литература***


1. Шелепин Н. А. Смарткарты на основе отечественных микросхем. Разработка, производство, применение // Наноиндустрия, 2017. — Спецвыпуск (74). — С. 12–13.
2. Красников Г. Я., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Международная научно-техническая конференция с элементами научной школы для молодежи. — М.: Зеленоград, 2010.
3. Нуйкин А. В., Кравцов А. С. Разработка и внедрение кристаллов для смарт-карт на российском и международном рынках на основе решений АО «НИИМЭ» // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. № 1 (161). — М.: Зеленоград, 2016.
4. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Мытник К. Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — № S (89).
5. Горнев Е. С. Дианов Д. М. и др. Актуальные задачи микроэлектроники: технологии и микросхемы. Научные результаты НИИ Молекулярной электроники за 2019 год / Под редакцией Академика Г. Я. Красникова. Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники». — Москва, Зеленоград, 2020.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.79.81

# Применение методов машинного обучения для функциональной верификации микропроцессора

## Machine Learning Methods for Microprocessor Functional Verification

**Гревцев Н. А.[1], Чибисов П. А.[1], к. т. н., Шумилин С. С.[2]**
*[1] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*
*chibisov@cs.niisi.ras.ru*
*[2] Межведомственный суперкомпьютерный центр Российской академии наук*
*119334, г. Москва, Ленинский просп., 32а*

**Grevtsev N. A.[1], Chibisov P. A.[1], Ph.D, Shumilin S. S.[2]**
*[1] SRISA RAS*
*bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218*
*chibisov@cs.niisi.ras.ru*
*[2] Joint SuperComputer Center of the Russian Academy of Sciences*
*32a Leninsky Ave., Moscow, 119334*

В статье обосновывается применимость методов машинного обучения для функциональной верификации моделей микропроцессора. Предлагается методика получения экстракта приложений пользователя для повышения покрытия тестирования. Это достигается за счет имитации поведения приложений на уровне машинного кода.
**Ключевые слова:** функциональная верификация; машинное обучение; нейронные сети; направленное стохастическое тестирование.

The article substantiates the applicability of machine learning methods for the functional verification of microprocessor models. A method for obtaining an extract of user applications to increase the testing coverage has been proposed. This is achieved by simulating the behavior of applications at the machine code level.
**Keywords:** functional verification; machine learning; random test generation; coverage-driven test generation; neural networks; executable machine code analysis; deep learning.

Сложность разрабатываемых микропроцессоров непрерывно растет: усложняется микроархитектура, наращивается число ядер в целях повышения производительности, что приводит к необходимости развивать фундаментальные научные подходы и методы для последующего применения в маршруте тестирования. Поэтому вопрос получения нового знания о том, как направить случайный тестовый код в сторону реальных задач, является актуальным и одним из ключевых при разработке новых методов верификации [1].

Несмотря на то что стохастическое псевдослучайное тестирование является одним из ключевых инструментов в маршруте верификации моделей микропроцессоров, полностью случайные тесты не позволяют качественно протестировать «сложнодостижимые» ситуации (так как без инженерного знания и специального

нацеливания тестов на те или иные аспекты микроархитектуры тесты либо не являются валидными, либо содержат нереалистичный код) [2].

В то же время запуск пользовательских задач в качестве инструмента тестирования RTL-модели неприменим из-за чрезвычайно большой длины тестов, а также неравномерно распределенной «сложности» кода программы (интересные с точки зрения тестирования ситуации могут отстоять во времени на миллионы тактов, что приводит к медленному росту покрытия и к бесполезной трате машинных ресурсов при моделировании однотипных последовательностей инструкций).

Зачастую критические ошибки обнаруживаются в уже выпущенном кристалле СБИС вследствие невозможности полноценно запустить операционную систему и приложения пользователя на RTL-модели. Основной причиной этого является низкая скорость моделирования RTL-кода.

Несмотря на постоянно совершенствующуюся систему стохастического тестирования, запуск параллельной симуляции тестовой системы на многопоточном кластере, а также направление тестовых сценариев с помощью эвристик, покрыть все возникающие в реальных пользовательских приложениях ситуации не представляется возможным. Полноценный запуск операционной системы на рабочих частотах может позволить обнаружить большинство оставшихся в проекте ошибок до выпуска готового изделия и передачи его конечным пользователям. По этой причине даже крупные компании — разработчики МП вынуждены делать дорогостоящий «тестовый» запуск перед полноценным выходом процессора на рынок.

Применимость методов машинного обучения для тестирования моделей процессора в настоящее время исследуется в крупнейших иностранных технологических компаниях (исследовательские центры ARM, Intel, IBM и другие) и институтах. Однако исследования проводятся только с точки зрения машинного обучения в области формальной верификации, генерации тестов с использованием символического выполнения и решения ограничений, а также для поиска нерегулярных ошибок в уже изготовленном кристалле СБИС микропроцессора [3, 4, 5].

В рамках данной работы планируется доказать применимость инструментов машинного обучения для функциональной верификации RTL-модели микропроцессора на системном уровне. Основным результатом проведенного исследования является возможность имитировать поведение набора пользовательских приложений на уровне машинного кода, а также автоматизация процесса анализа труднодостижимых в рамках классического маршрута верификации ситуаций в целях повышения тестового покрытия.

Предлагаемая идея позволит использовать преимущества запуска приложений пользователя с точки зрения обнаружения ошибок в микропроцессоре на ранний этап разработки его RTL-модели (когда стоимость исправления ошибки минимальна). Раннее обнаружение микроархитектурных ошибок достигается путем включения в состав псевдослучайный тестов эквивалентного «экстракта» пользовательских программ, построенного с помощью методов машинного обучения.

***Литература***

1. Grevtsev N.A., Chibisov P.A. A novel technique for atomic instructions functional verification using lock contention analysis // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium.

2. Grevtsev N.A., Chibisov P.A. Multicore Processor Models Verification in the Early Stages // SELECTED ARTICLES of the VIII All-Russia Science&Technology Conference MES-2018 Part1.
3. Ambalakkat S. Optimization of Constrained Random Verification using Machine Learning // University of Minnesota M.S.E.E. 2018.
4. Gogri Saumil. Stimulus Optimization in Functional Verification using Machine Learning // Proceedings of CDNLive, Cadence Inc. Annual Conference, San Jose, CA, April 2019.
5. PfeiferNícolas, Zimpel Bruno V., Andrade Gabriel A.G. and Luiz C.V. A reinforcement learning approach to directed test generation for shared memory verification // In Proceedings of the 23rd Conference on Design, Automation and Test in Europe (DATE '20). EDA Consortium, San Jose, CA, USA, 538–543.

The applicability of machine learning methods for testing processor models is currently being investigated in the largest foreign technology companies (research centers ARM, Intel, IBM, and others) and institutes. However, the research is conducted only from the point of view of machine learning in the field of formal verification, test generation using symbolic execution and constraint solving, as well as to search for irregular errors in an already manufactured VLSI chip of a microprocessor ([3], [4], [5]).

In this work, it is planned to prove the applicability of machine learning tools for functional verification of the microprocessor RTL-model at the system level. The main result of the conducted research is the ability to simulate the behavior of a set of user applications at the machine code level, as well as automation of the analysis process of situations that are difficult to achieve within the classical verification route in order to increase test coverage.

***References***

1. Grevtsev N.A., Chibisov P.A. A novel technique for atomic instructions functional verification using lock contention analysis // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium.
2. Grevtsev N.A., Chibisov P.A. Multicore Processor Models Verification in the Early Stages // SELECTED ARTICLES of the VIII All-Russia Science&Technology Conference MES-2018 Part1.
3. Ambalakkat S. Optimization of Constrained Random Verification using Machine Learning // University of Minnesota M.S.E.E. 2018.
4. Gogri Saumil. Stimulus Optimization in Functional Verification using Machine Learning // Proceedings of CDNLive, Cadence Inc. Annual Conference, San Jose, CA, April 2019.
5. PfeiferNícolas, Zimpel Bruno V., Andrade Gabriel A.G. and Luiz C.V. A reinforcement learning approach to directed test generation for shared memory verification // In Proceedings of the 23rd Conference on Design, Automation and Test in Europe (DATE '20). EDA Consortium, San Jose, CA, USA, 538–543.

УДК 004.272.43 + 004.23 + 004.25 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.82.83

# Программное обеспечение модулей на базе микропроцессоров К1879ВМ8Я для высокопроизводительных вычислений

## Software for Modules Based on Microprocessors K1879BM8Я for High-performance Computing

**Биконов Д. В., Бражкин А. А., Черников А. В., Эйсымонт Л. К.**
*АО НТЦ «Модуль»*
*125167, г. Москва, 4-я ул. 8 Марта, 3*
*d.bikonov@module.ru*

**Bikonov D. V., Brazhkin A. A., Chernikov A. V., Eysymont L. K.**
*RC Module JSC*
*3 Eighth March 4th St., Moscow, 125190*
*d.bikonov@module.ru*

Рассказывается о последних разработках в области программного обеспечения для модулей на базе микропроцессоров К1879ВМ8Я с архитектурой NeuroMatrix. Приводятся обоснования выбора компонентов программного обеспечения, проблемы реализации и результаты тестирования.
**Ключевые слова:** многоядерный процессор-ускоритель; LLVM; OpenCL; PGAS; высокопроизводительные вычисления.

Разработка процессоров-ускорителей, особенно для задач искусственного интеллекта, в последнее время является одним из наиболее востребованных направлений в области суперкомпьютеров. Построенные на их основе вычислительные серверы не только обеспечивают преодоление экзафлопсного барьера, что еще совсем недавно представлялось сложнейшей задачей, но и позволяют строить специализированные суперкомпьютеры для решения задач в области искусственного интеллекта с производительностью до десятков экзафлопс.

Прогресс в разработке процессоров-ускорителей обеспечен не только достижениями в области технологий, но и особенностями их архитектуры и микроархитектуры, которые уже отражают даже специфику прикладных алгоритмов. Заметна и другая тенденция — для комфортной работы пользователей с такими процессорами в их программном обеспечении стремятся использовать программное обеспечение с открытым исходным кодом, чтобы обеспечить возможность переносимости алгоритмов между архитектурами микропроцессоров без потери эффективности.

Наличие обозначенной проблемы выбора моделей параллельных программ и их реализации на специальных процессорах-ускорителях иллюстрируется на примере выбора функций библиотеки управления процессами и их взаимодействиями (БУПВ/М) [1], функций библиотеки загрузки и обмена для сетей процессоров, парадигмы параллельного программирования и их реализации для специализированного процессора-ускорителя NeuroMatrix (К1879ВМ8Я) [2]. В контексте этой проблемы специфика К1879ВМ8Я состоит в иерархической организации его вычислительных узлов и связанной с этим иерархической организации внутрикристальной высокоскоростной сети коммутации каналов с непосредственной

настройкой коммуникационных ресурсов. Это делало наиболее подходящей моделью параллельных программ специфическую модель master-slave.

В докладе объясняется:

- выбор средств разработки программного обеспечения;
- выбор функций БУПВ/М с описаниями и принятыми решениями при реализации;
- выбор функций библиотеки загрузки и обмена данными;
- выбор парадигмы параллельного программирования;
- результаты тестирования различных компонентов ПО.

***Литература***

1. Биконов Д. В., Пузиков А. Д., Сивцов А. С., Эйсымонт Л. К. Трехуровневая система параллельного программирования гибридного 21-ядерного скалярно-векторного микропроцессора NM6408MP // Вопросы кибербезопасности, 2019. — № 4. — С. 22–34.
2. Эйсымонт А. Л., Черников В. М., Черников Ан. В., Черников Ал. В., Косоруков Д. Е., Насонов И. И., Комлев А. А. Гетерогенная многопроцессорная система на кристалле с производительностью 512 Gflops // Системы высокой доступности, 2018. — Т. 14. — № 3. — С. 49–56.
3. Эйсымонт Л. К., Никитин А. И., Биконов Д. В., Бражкин А. А., Пеплов И. С., Федоренко П. П., Ермаков С. С., Эйсымонт А. Л., Комлев А. А. Исследовательский проект массово-параллельного процессора на базе мультитредовых ядер со специализированными ускорителями // Вопросы кибербезопасности, 2020. — № 3. — С. 39–55.

УДК 004.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.84.85

# Эффективная реализация полносвязных и сверточных слоев для нейросетевых вычислений на ядре NMC4 с сопроцессором плавающей точки

## The Effective Implementation of Complete and Convolutional Layers for Neural Network Calculations Using the NMC4 Kernel and a Floating Point Coprocessor

**Бирюков А. А.**
*ЗАО НТЦ «Модуль»*
*125190, г. Москва, 4-я ул. 8 марта, 3*
*info@module.ru*

**Biryukov A. A.**
*RC Module JSC*
*3 Eighth March 4th St., Moscow, 125190, Russia*
*info@module.ru*

Реализован набор средств для эффективного выполнения нейросетевых задач для процессоров семейства NeuroMatrix® поколения NMC4, включающий библиотечные функции уровней процессорного ядра и кластера ядер, а также сопутствующие файлы настроек и сценариев их использования в составе фреймворка NMDL.
**Ключевые слова:** NMDL; ИИ-ускоритель; NeuroMatrix®.

***Возможности ядра nmc4 для перемножения матриц***

Архитектура NMC4 нацелена на высокопроизводительную обработку данных, для этого в ее состав включаются матричные сопроцессоры, в том числе появившийся впервые в этой версии архитектуры сопроцессор для работы с числами с плавающей точкой

***Критические аппаратные ресурсы***

Большой объем вычислений, необходимый для мультипликативных матричных операций, предъявляет высокие требования ко всем подсистемам вычислительного устройства. Задача программиста — выстроить для задачи оптимальный вычислительный конвейер, обеспечивающий максимальную загрузку вычислительных ядер (ALU).

***Конвейерное вычисление свертки тензоров***

Одна вычислительная команда позволяет перемножить матрицы 32×2 и 2×2 на одной ячейке сопроцессора, такая команда выполняется 32 процессорных такта, каждая из четырех ячеек сопроцессора может независимо выполнять такую команду параллельно с подгрузкой-выгрузкой данных из векторных регистров.

***Оптимальное использование внутренней памяти***

Внутренняя память процессора также является дефицитным ресурсом, эффективное вычисление свертки требует бесперебойной подгрузки данных в регистры.

***Организация работы внутри кластера***

При построении систем на кристалле процессоры с ядром NMC4 можно объединять в вычислительные кластеры, возникает задача программирования совместной работы процессоров в кластере.

***Совместная работа нескольких кластеров***

Процессор 6408 на базе ядра NMC4 содержит четыре кластера по четыре ядра, для эффективного решения задачи inference все эти ядра должны работать совместно.

Интерес представляет схема работы с данными во внешней памяти.

***Дополнительные оптимизации***

Нейросетевые алгоритмы обычно состоят из чередующихся операций над тензорами мультипликативного и поэлементного характера. Поэлементные операции значительно менее требовательны к ресурсу ALU, но также требуют больших объемов памяти, как и мультипликативные операции; их можно и по возможности нужно совмещать (fuse) с мультипликативными операциями.

***Литература***

1. Черников А. В., Черников В. М., Шелухин П. Е., Шелухин А. М. Высокопроизводительное процессорное ядро NMC4 для обработки векторных данных в форматах с плавающей и фиксированной точками // Доклады Международной конференции «Микроэлектроника-2017».
2. NMDL (NeuroMatrix® DeepLearning) — комплект аппаратных и программных средств для разработки и реализации глубоких нейронных сетей. Руководство пользователя.

УДК 004.032.26 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.86.88

# Результаты исследования микросхем на основе СФ-блока ускоренного расчета нейронных сетей IVA TPU

## Preliminary Characteristics of Integrated Circuits Based on IVA TPU IP-core for Accelerated Calculation of Artificial Neural Networks

**Осипенко П. Н., Увкин И. В.**
*IVA Technologies*
*109316, г. Москва, Волгоградский пр-т, 43, к. 3*

**Osipenko P. N., Uvkin I. V.**
*IVA Technologies*
*bld. 3, 43 Volgogradskiy Ave., Moscow, 109316*

Приводятся предварительные результаты исследования характеристик микросхем IVA H и IVA E, построенных на основе двух реализаций СФ-блока ускоренного расчета нейронных сетей IVA TPU с различными параметрами конфигурации. Приводятся оценки производительности при расчете стандартных искусственных нейронных сетей, параметры энергопотребления и частотные характеристики.
**Ключевые слова:** тензорные вычисления; искусственные нейронные сети; Tensor Flow; СФ-блок; искусственный интеллект; СнК.

The paper presents preliminary characteristics of IVA H and IVA E integrated circuits based on two implementations of the IVA TPU IP-core for accelerated calculation of artificial neural networks, including performance estimates for standard neural networks, energy consumption parameters and frequency characteristics.
**Keywords:** tensor calculations; artifical neural networks; Tensor Flow; IP-core; artifical intellect; SoC.

СФ-блок IVA TPU, разработанный компанией IVA Technologies, предназначен для ускорения расчета искусственных нейронных сетей при встраивании его в состав СнК.

Структурная схема СФ-блока IVA TPU приведена на рис. 1.

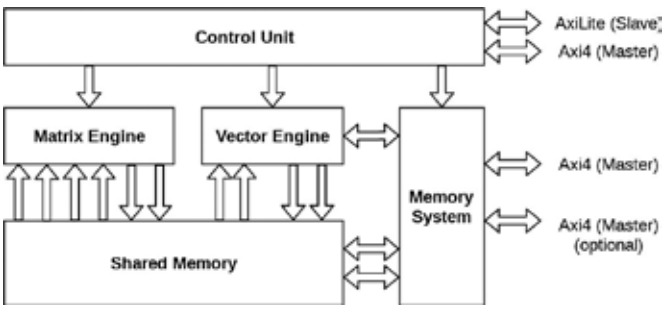



**Рис. 1.** Структурная схема СФ-блока IVA TPU

Разработаны и изготовлены по технологии 28 нм микросхемы IVA H и IVA E, основанные на различных реализациях СФ-блока IVA TPU.

Структурная схема микросхемы IVA H, которая ориентирована на серверные применения, приведена на рис. 2.

Для данной микросхемы СФ-блок IVA TPU сконфигурирован со следующими основными параметрами: количество вычислительных элементов — 16 384, объем встроенной памяти — 16 МБ. Предварительные результаты исследования микросхемы показали полную функциональную работоспособность основных блоков и интерфейсов микросхемы.

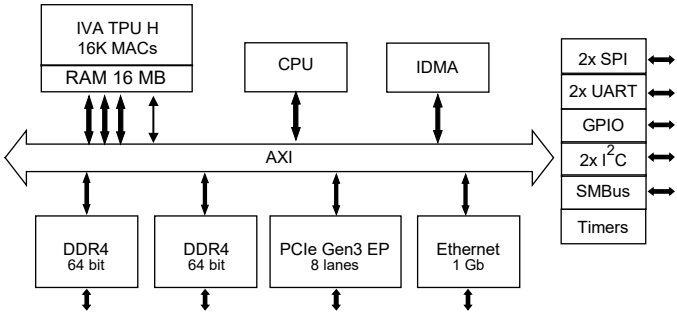



**Рис. 2.** Структурная схема микросхемы IVA H

Структурная схема микросхемы IVA E, которая ориентирована на встраиваемые применения, приведена на рис. 3.

Для данной микросхемы СФ-блок IVA TPU сконфигурирован со следующими основными параметрами: количество вычислительных элементов — 4096, объем встроенной памяти — 8 МБ. Предварительные результаты исследования микросхемы показали полную функциональную работоспособность ее основных блоков и интерфейсов.

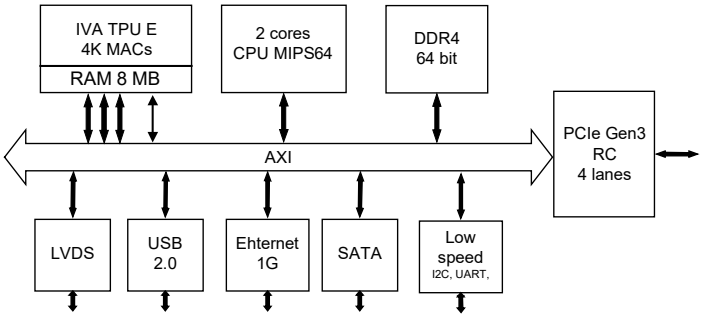



**Рис. 3.** Структурная схема микросхемы IVA E

В докладе приводятся более полные результаты измерения параметров микросхем, в том числе оценки производительности при расчете стандартных искусственных нейронных сетей, параметры энергопотребления и частотные характеристики.

The IVA TPU IP-core, developed by IVA Technologies, is designed to speed up the calculation of artificial neural networks when embedded in the SoC.

The block diagram of the IP-core is shown in Fig. 1.

The block diagram of the IVA H chip is shown in Fig. 2.

For this chip, the IVA TPU IP-core has been configured with the following main parameters: the number of computing elements is 16 384, the amount of built-in memory is 16 MB. The preliminary results of the study of the chip have shown the full functional correctness of the main blocks and interfaces of the chip.

The block diagram of the IVA E chip is shown in Fig. 3.

For this chip, the IVA TPU IP-core has been configured with the following main parameters: the number of computing elements is 4096, the amount of built-in memory is 8 MB. The preliminary results of the study of the chip have shown the full functional correctness of the main blocks and interfaces of the chip.

The report provides more comprehensive results of measuring the parameters of microcircuits, including performance estimates, energy consumption parameters and frequency characteristics.

УДК 004.318 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.89.90

# Алгоритм параллельного двухступенчатого вычисления CRC на основе матриц преобразования

## An Algorithm for Parallel Two-step CRC Computation Based on Transformation Matrices

**Косарев И. М.**
*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*
*ikosarev@cs.niisi.ras.ru*

**Kosarev I. M.**
*SRISA RAS*
*bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218*
*ikosarev@cs.niisi.ras.ru*

Представлен параллельный способ расчета CRC за два такта для использования в составе программируемого коммуникационного контроллера.
**Ключевые слова:** контрольная сумма; обнаружение ошибок; параллельный CRC; сдвиговый регистр; ПЛИС.

This paper revises parallel two-step matrices based CRC computation architecture for programmable communication controller use.
**Keywords:** cyclic redundancy check; error detection; parallel CRC; LFSR; FPGA.

Вычисление и контроль CRC (cyclic redundancy check) широко используются для обнаружения ошибок и проверки целостности данных в коммуникационных интерфейсах и системах хранения данных. Общий подход сводится к созданию функции, описывающей поведение сдвигового регистра с обратной связью (LFSR), осуществляющего побитовое деление входного сообщения на генерирующий полином с получением остатка. Одним из способов снижения задержки является использование параллельной обработки [1].

Уменьшение влияния обратной связи (ОС), вносящей существенную задержку в путь распространения сигнала, требует иных математически обоснованных методов [2]. Одним из способов решения этой задачи может быть упрощение исходного полинома путем разложения его на два с более низкой степенью [3], что требует предварительного их подбора или иных методов формирования. Другой способ состоит в использовании рассчитанных заранее таблиц преобразования (LUT), включающих все возможные состояния. Также существует алгоритм на основе двухуровневых LUT-таблиц с уменьшенной разрядностью [4], что требует также решить задачу по их предварительному созданию и хранению. Альтернативный метод, основанный на теории линейных последовательных систем (ЛПС), использующий F-матрицы преобразования, описан в работе [5].

Предложен алгоритм, основанный на рекурсивном преобразовании функции переходов, описывающей набор состояний LFSR как ЛПС, для сообщения длиной $w$ бит в виде $C' = F^w \cdot C + F^{w-1} \cdot A, GF(2)$, где $C = [c_0, c_1, ..., c_{n-1}]^T$ и $A = [a_0, a_1, ..., a_{n-1}]^T$ являются подмножествами дискретных состояний схемы и входных данных соответственно, а $F^w$ и $F^{w-1}$ — матрицы переходов. На рис. 1 представлена блок-схема

модуля расчета m-разрядной CRC для *w* бит данных на основе представленного алгоритма.

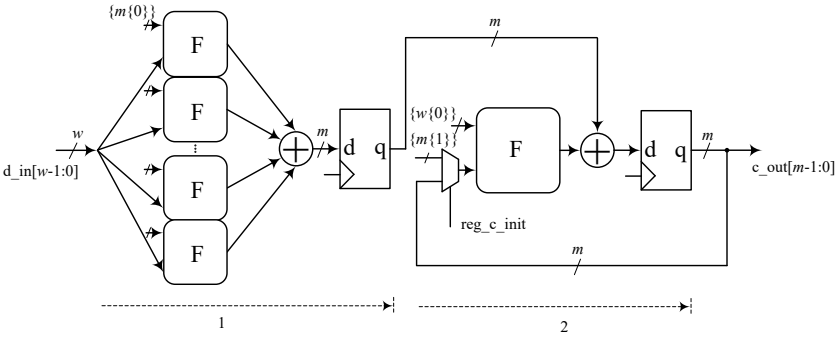



**Рис. 1.** Блок-схема модуля расчета m-разрядной CRC для *w* бит данных

Разработаны синтезируемые Verilog RTL-модели для алгоритмов CRC16 и CRC32 и шин данных 64, 128, 256 и 512 бит, реализующие представленные способы. Проведено сравнительное моделирование в САПР и синтез в ПЛИС. Результаты показали, что предложенный алгоритм обладает относительно меньшими либо сравнимыми критическими путями при сравнимых или несколько больших аппаратных затратах, при этом позволяя реконфигурировать блок расчета для различных полиномов, произвольной разрядности шины данных независимо от длины пакета. Разработанный на основе представленного алгоритма модуль расчета CRC использован в составе контроллера PCI Express 3.0.

***Литература***

1. Stavinov E. A Practical Parallel CRC Generation Method // Circuit-Cellar., 2010. № 234. January. P. 38–45.
2. Semerenko V. P. The theory of parallel CRC codes based on automaton models [Text] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. ISSN 1729-3774. 2016. 6/9 (84). P. 45–54.
3. Kennedy C., Manii J., Gribben J. Retimed Two Step CRC Computation on FPGA [Text] // 23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE 2010.
4. Sun Y., Kim M. S. A Pipelined CRC Calculation Using Lookup Tables [Text] // 7th IEEE Consumer Communications and Networking. 2010.
5. Campobello G., Patane G., Russo M. Parallel CRC realization [Text] // IEEE Transactions on Computers, 2003. V. 52. Issue 10. P. 1312–1319.

УДК 004.231 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.91.93

# Анализ перспективных подходов к аппаратной поддержке криптографических алгоритмов в процессорах общего назначения

## Analysing Promising Approaches for Hardware Support of Cryptographic Algorithms in General-purpose Processors

**Советов П. Н., к. т. н.**
*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*
*АО «МЦСТ»*
*117105, г. Москва, ул. Нагатинская, 1, стр. 23*
*peter.sovietov@gmail.com*

**Sovietov P. N., Ph.D**
*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*
*MCST JSC*
*bld. 23, 1 Nagatinskaya St., Moscow, 117105*
*peter.sovietov@gmail.com*

Проанализирован ряд перспективных подходов к аппаратной поддержке современных криптографических алгоритмов в процессорах общего назначения. Рассмотрены основные способы аппаратного ускорения криптоалгоритмов. Предложена методика совместного программно-аппаратного проектирования криптографического расширения системы команд.
**Ключевые слова:** расширение системы команд процессора; предметно-ориентированные ускорители; симметричная криптография.

A number of promising approaches has been analyzed for hardware support of modern cryptographic algorithms in general-purpose processors. The main methods of hardware acceleration of cryptoalgorithms have been described. A technique for hardware/software codesign of a cryptographic extension of the instruction set has been proposed.
**Keywords:** instruction set extension; domain-specific accelerators; symmetric cryptography.

Немалая часть вычислительных задач современных процессоров общего назначения связана с областью криптографии. В частности, для защищенной передачи данных в сети Интернет по протоколу TLS 1.3 необходимо поддерживать функционирование целого ряда криптоалгоритмов.

Поддержка криптоалгоритмов может быть осуществлена как программным, так и аппаратным образом. К преимуществам аппаратной поддержки криптографии относятся:

- высокая производительность криптографических вычислений,
- высокая энергоэффективность криптографических вычислений,
- возможность защиты реализации криптоалгоритма от атак по побочным каналам.

Высокая энергоэффективность аппаратных реализаций криптоалгоритмов возможна благодаря специализации вычислений без дополнительных накладных расходов на декодирование команды и обращение к регистровому файлу на каждом такте, присущих процессору общего назначения. При аппаратной реализации криптоалгоритма возможно устранение потенциальных уязвимостей при атаке по времени и, в частности, атаке на кеш-память. При этом обращения к табличным данным могут быть заменены прямыми вычислениями, выполняемыми за постоянное время.

Аппаратное ускорение выбранного криптоалгоритма может быть осуществлено различными способами. Полная аппаратная реализация в виде фиксированной схемы вычислений позволяет получить наиболее высокие характеристики производительности и энергоэффективности криптоалгоритма. Вместе с тем при необходимости поддержать большое количество криптоалгоритмов на аппаратном уровне, включая заранее неизвестные их варианты, может быть целесообразно добавить в набор команд процессора общего назначения расширение в виде базовых криптографических операций, ключевых для рассматриваемых алгоритмов [1, 2]. Еще одним решением в рассматриваемом случае может выступить программируемый криптографический сопроцессор [3–5]. Отдельный интерес при аппаратной реализации таблицы подстановки может представлять техника bitslicing.

Для автоматизации проектирования аппаратных средств поддержки криптографии в процессоре общего назначения предложена методика на основе использования современных технологий компиляции. Эта методика использует SMT-решатель и позволяет на основе набора программных реализаций криптопримитивов получить RTL-реализацию программируемого ускорителя.

***Литература***

1. Faz-Hernández A., López J., D. S. de Oliveira A. K. SoK: A performance evaluation of cryptographic instruction sets on modern architectures // Proceedings of the 5th ACM on ASIA Public-Key Cryptography Workshop, 2018. P. 9–18.
2. Drucker N., Gueron S., Krasnov V. Making AES great again: the forthcoming vectorized AES instruction // 16th International Conference on Information Technology-New Generations (ITNG 2019). — Springer, Cham., 2019. P. 37–41.
3. Sayilar G., Chiou D. Cryptoraptor: High throughput reconfigurable cryptographic processor // 2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). IEEE, 2014. P. 155–161.
4. Kiningham K. et al. Falcon—A Flexible Architecture For Accelerating Cryptography // 2019 IEEE 16th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). IEEE, 2019. P. 136–144.
5. Chen Y. et al. A programmable Galois field processor for the internet of things // Proceedings of the 44th Annual International Symposium on Computer Architecture. 2017. P. 55–68.

A large part of the computational tasks of modern general-purpose processors is associated with the field of cryptography. In particular, for secure data transmission on the Internet using the TLS 1.3 protocol, it is necessary to support a number of cryptoalgorithms.

Cryptoalgorithms can be supported both at software and hardware level. The benefits of hardware cryptography support include:

- high performance of cryptographic computations,
- high energy efficiency of cryptographic computations,
- the ability to protect the implementation of the cryptoalgorithm from side-channel attacks.

High energy efficiency of hardware implementations of cryptoalgorithms is possible due to the specialization of computations, without additional overhead costs of instruction decoding and accessing a register file at each cycle, typical for a general-purpose processor. With the hardware implementation of the cryptoalgorithm, it is possible to eliminate potential vulnerabilities of a timing attack and, in particular, a cache-based attack. In this case, access to data tables can be replaced by direct calculations performed in constant time.

Hardware acceleration of the chosen cryptoalgorithm can be done in different ways. Full hardware implementation in the form of a fixed computation scheme allows obtaining the highest performance and energy efficiency of the cryptoalgorithm. At the same time, if it is necessary to support a large number of cryptoalgorithms at the hardware level, including their previously unknown variants, it may be advisable to add an extension to the instruction set of a general-purpose processor in the form of basic cryptographic operations that are key for the algorithms under consideration [1, 2]. Another solution in this case can be a programmable cryptographic coprocessor [3–5]. The bitslicing technique may be of particular interest in the hardware implementation of the lookup table.

To automate the design of hardware for supporting cryptography in a general-purpose processor, a technique based on the use of modern compilation technologies has been proposed. This technique uses an SMT solver and allows obtaining an RTL implementation of a programmable accelerator based on a set of software implementations of crypto primitives.

***References***

1. Faz-Hernández, Armando, Julio López and Ana Karina DS de Oliveira. SoK: A performance evaluation of cryptographic instruction sets on modern architectures. Proceedings of the 5th ACM on ASIA Public-Key Cryptography Workshop. 2018.
2. Drucker, Nir, Shay Gueron and Vlad Krasnov. Making AES great again: the forthcoming vectorized AES instruction. 16th International Conference on Information Technology-New Generations (ITNG 2019). Springer, Cham, 2019.
3. Sayilar, Gokhan and Derek Chiou. Cryptoraptor: High throughput reconfigurable cryptographic processor. 2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). IEEE, 2014.
4. Kiningham Kevin et al. Falcon—A flexible architecture for accelerating cryptography. 2019 IEEE 16th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). IEEE, 2019.
5. Chen Yajing et al. A programmable Galois field processor for the internet of things. Proceedings of the 44th Annual International Symposium on Computer Architecture. 2017.

УДК 004.315 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.94.95

# Анализ побочных каналов защищенных микроконтроллеров. Утечка информации при реализации маскирования для сети Фейстеля

## Side Channel Analysis. Leakage in the Implementation of the Boolean Mask

**Благодатов В. В.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*vblagodatov@niime.ru*

**Blagodatov V. V.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*vblagodatov@niime.ru*

В работе рассмотрены причины утечки информации по побочному каналу связи в схеме маскирования Boolean Mask. В качестве алгоритма шифрования использовался алгоритм шифрования DES.
**Ключевые слова:** анализ побочных каналов; двоичная маска; DES; Flip-Flop; сеть Фейстеля; смарт-карты.

This work presents an explanation of the side channel leakage in the masking scheme Boolean Mask. DES was used as the encryption algorithm.
**Keywords:** Side Channel Analysis; Boolean Mask; DES; Flip-Flop; Feistel Block Cipher; Smart Cards.

Любая микросхема во время работы индуцирует паразитное электромагнитное поле, которое содержит информацию обо всех электрических токах микросхемы или смарт-карты [1]. После обработки и анализа данных электромагнитного излучения злоумышленник может извлечь критически важную информацию, например криптографический ключ алгоритма шифрования данных. Для снижения риска утечки информации необходимо разработать меры защиты и верифицировать их эффективность путем измерения и анализа побочных каналов утечки информации.

В данной работе рассмотрим один из механизмов защиты блочных алгоритмов шифрования на базе сети Фейстеля, применяемой в алгоритмах DES, ГОСТ 28147 (Магма). Механизм защиты Boolean mask будем рассматривать на примере алгоритма DES. Суть его заключается в маскировании всех промежуточных данных шифрования.

Перед началом шифрования через операцию XOR на данные накладывается сгенерированная случайная маска размером 64 бита. В данной работе будем рассматривать вариант генерации маски, действующей на протяжении всех раундов одной операции шифрования или расшифрования. В соответствии с маской необходимо модифицировать таблицу подстановки Sbox. После окончания шифрования маску необходимо снять.

Схема раунда алгоритма DES следующая:

$$L_i = R_{i-1},$$

$$R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i), \text{ где } f(R_{i-1}, K_i) = P(S(EP(R_{i-1}) \oplus K_i)).$$

Схема раунда с маскированием:

$$S'(x) = S(x \oplus EP(a_1)) \oplus P^{-1}(a_1 \oplus a_2),$$

$$L'_i = R'_{i-1} \oplus a_1 \oplus a_2,$$

$$R'_i = L'_{i-1} \oplus f'(R'_{i-1}, K_i).$$

На первый взгляд, после совершения маскирования и до снятия маски утечка не может произойти, так как все данные скрыты случайной маской. Но это не всегда так. Мы не будем рассматривать атаки на основе взаимного анализа раундов. Рассмотрим реализацию, в которой операции расширения и подстановки выполнены комбинационной логикой за один такт, а регистры хранят состояние между раундами,что является довольно распространенной аппаратной реализацией для ASIC- и FPGA-микросхем.

При такой реализации Hamming Distance переключения регистра равно

$$HD(R_i, R_{i+1}) = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i) \oplus P^{-1}(a_1 \oplus a_2) \oplus L_i \oplus f(R_i, K_{i+1}) \oplus P^{-1}(a_1 \oplus a_2).$$

Как можем видеть, маска редуцируется и остается исходное значение Hamming Distance:

$$HD(R_i, R_{i+1}) = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i) \oplus L_i \oplus f(R_i, K_{i+1}).$$

**Таблица 1.** Сравнение Hamming Distance для 4 из 32 бит регистра R

| Mask and Data | Registry and leakage | | |
|---|---|---|---|
| | $R_{i-1}$ | $R_i$ | HD ($R_{i-1}$, $R_i$) |
| Clear Data | 0110 | 0101 | 0011 |
| Mask | 1100 | 1100 | |
| Masked Data | 1010 | 1001 | 0011 |

Утечка значения HD актуальна для устройств со схожими переходными процессами записи нуля и единицы в ячейку [2]. Тогда в один класс относятся биты с измененным состоянием, а неизмененные — в другой.

***Литература***

1. Шелепин Н.А. Смарткарты на основе отечественных микросхем. Разработка, производство, применение // Наноиндустрия, 2017. — Спецвыпуск (74). — С. 12–13.
2. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов, изд. 2-е, испр.: монография. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — 800 с.

УДК 004.386 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97

# Проблема унификации модулей на основе процессора «Эльбрус-2С3»

## The Problem of Unification of Modules Based on the Elbrus-2C3 Processor

**Чучко П. А., д. т. н., Бычков И. Н., Панченко Е. Г.**
*ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука»*
*119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24*
*panchen_e@ineum.ru*

**Chuchko P. A., Ph.D, Bychkov I. N., Panchenko E. G.**
*Brook INEUM PJSC*
*24 Vavilov St., Moscow, 119334, Russia*
*panchen_e@ineum.ru*

Разработан модуль COM Express для интеграции в вычислительные системы. Приведены характеристики разработанного модуля и возможные варианты использования. Описаны критерии оптимизации разработки для обеспечения универсальности применения модуля для различных назначений.
**Ключевые слова:** COM Express; модуль; «Эльбрус»; универсальный; оптимизация.

COM Express module has been developed for integration into computing systems. The characteristics of the developed module and possible use cases have been presented. Criteria for optimizing the design have been described to ensure the universality of the module for various purposes.
**Keywords:** COM Express; module; Elbrus; universal; optimization.

Специалистами ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» был разработан модуль COM Express Type 6 исполнения basic с возможностью интеграции в различные вычислительные системы и форм-факторы. В качестве аппаратной платформы был использован двухъядерный процессор «Эльбрус-2С3». Модуль содержит двухканальную оперативную память DDR4 объемом 8 ГБ, а также набор универсальных интерфейсов: LVDS, HDMI, HDA, USB, SATA, UART, PCI Express, MDI.

Одной из задач разработки модуля являлось обеспечение универсальности его применения в зависимости от назначения. Модули COM Express могут применяться в персональных и носимых компьютерах, в промышленности и авиации. В рамках работы были обозначены следующие критерии оптимизации и унификации разработки модуля:

- условия применения;
- контроль качества;
- затраты на разработку;
- цена.

Специальные условия эксплуатации, например, в гражданской авиации обусловлены необходимостью обеспечения особых конструктивных решений, ведущих к повышению себестоимости производства и снижению ремонтопригодности.

Разработка универсального модуля для различных сценариев использования позволяет снизить затраты и время на разработку, изготовление и тестирование

в сравнении с отдельными модулями для каждого назначения, а также обеспечить непрерывность производства. При этом описаны ситуации, при которых специализированные решения имеют преимущества над универсальными, и сформулированы условия оптимальности выбора.

Specialists of “Brook INEUM” PJSC have developed the COM Express Type 6 Basic module with the ability of integration into various computing systems and form factors. As a hardware platform dual-core processor Elbrus-2C3 was used. The module has dual-channel 8 GB DDR4 RAM and a set of universal interfaces: LVDS, HDMI, HDA, USB, SATA, UART, PCI Express, MDI.

One of the objectives of the module’s development was to ensure versatility of its use depending on the purpose. COM Express modules can be used in personal and wearable computers, in industry and aviation. As part of the work, the following criteria for optimizing and unifying the module’s development have been outlined:

- application conditions;
- quality control;
- development costs;
- price

Special operating conditions, such as in civil aviation, are caused by the need to provide special design solutions, leading to higher production costs and reduced maintainability.

The development of a universal module for different usage scenarios allows reducing costs and time for development, manufacturing and testing in comparison with separate modules for each purpose, as well as ensuring production continuity. The situations in which specialized solutions have advantages over universal ones have been described, and the optimal choice conditions have been formulated.

УДК 621.3.078.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.98.99

# Система помощи водителю (ADAS) от компании АО «ПКК Миландр»

## ADAS Platform Produced by “ICC Milandr” JSC

**Мякочин Ю. О.**
*АО «ПКК Миландр»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5*
*myakochin.yuri@ic-design.ru*

**Myakochin Y. O.**
*ICC Milandr JSC*
*5 Georgievski Ave., Zelenograd, Moscow, 124498*
*myakochin.yuri@ic-design.ru*

Представлены результаты разработки платформы для построения системы помощи водителю для дорожного транспорта. Система состоит из трех компонентов: миллиметрового радара, цифровой камеры и блока управления автомобилем.
**Ключевые слова:** система помощи водителю; радары; цифровая камера; адаптивный круиз-контроль.

“ICC Milandr” JSC has developed a platform for building ADAS system for cars. The system consists of radar, digital camera and control unit.
**Keywords:** ADAS; radar; digital camera; ACC.

Развитие современного автомобильного рынка связано с практически взрывным увеличением применения электронных систем в транспортных средствах. Это связано с постоянным ростом количества автомобилей на дорогах, снижением общей профессиональной подготовленности водителей, а также развитием электроники и снижением ее цены для конечных потребителей. Все эти тренды приводят, во-первых, к увеличению в процентном соотношении стоимости электронных систем в автомобиле до 30 % (и этот показатель будет расти), а во-вторых, к потребности у водителей к безопасности и комфорту при сохранении качества/скорости передвижения, текущего уровня подготовки водителей.

Для обеспечения потребностей рынка автомобилей существует текущий тренд передачи функций управления автомобилем от водителя к электронным системам. Этот тренд в дальнейшем должен привести к появлению полностью автономных транспортных средств.

На сегодняшний день следующие электронные системы автомобилей становятся все более распространенными и из люксовых брендов переходят на широкий рынок: адаптивный круиз-контроль, экстренное торможение, удержание полосы и распознавание дорожных знаков. Часть этих систем уже можно встретить даже в автомобильных регистраторах, но там они применяются в виде информационных систем и больше для привлечения покупателей, чем для решения функций, которые приведены выше, и управление дорожным средством видеорегистратору никто не доверит.

Для реализации автомобильных функций система должна быть надежной, отказоустойчивой и относительно недорогой. Разработкой такой платформы занимается компания АО «ПКК Миландр». Система состоит из трех элементов: миллиметрового радара, цифровой камеры и блока управления автомобилем. Применение двух датчиков камеры/радара позволяет системе работать в более широких погодных условиях.

К основным характеристикам разработанного радара относится его работа в двух диапазонах — ближней и дальней зонах. В ближней зоне угол обзора радара достигает 90–100 градусов и обеспечивает детектирование объектов в непосредственной близости от автомобиля (до 50 метров). В дальней зоне угол обзора снижается до 15 градусов, но дальность обнаружения возрастает до 150 метров, что обеспечивает контроль автомобилей на трассе. Сигнальная обработка радара выполнена на отечественном сигнальном процессоре [1].

Цифровая камера захватывает поток видеоизображения и передает его по скоростному интерфейсу FPD Link III. Этот интерфейс обеспечивает как передачу данных, так и питание камеры, что значительно повышает надежность всей системы.

Блок управления автомобилем собирает информацию с датчиков (камеры и радара), реализует распознавание объектов в видеопотоке, совмещает отметки от радара с распознанными объектами от камеры и передает команды автомобилю на торможение или ускорение. Для распознавания объектов от видеокамер применяется нейронная сеть, натренированная на элементы дорожного трафика. Блок позволяет подключать до восьми цифровых камер, что помимо адаптивного контроля дает возможность реализовать функцию кругового обзора.

Еще одной подсистемой блока управления является навигационная система, состоящая из инерциальной навигационной системы и спутникового приемника. Эта система позволяет информировать о текущем положении автомобиля, а также его угловых эволюциях: наклоны, подъемы, заносы и так далее.

Блок управления автомобилем непосредственно завязан на безопасность всего транспортного средства, а это значит, что к надежности всего блока предъявляются повышенные требования. При проектировании модуля была проработана его функциональная безопасность в соответствии с требованиями ISO 26262.

Проектирование всей системы в компании АО «ПКК Миландр» позволило сбалансировать функции в виде отдельных блоков.

Элементы этой системы разрабатываются в рамках постановления № 109 Минпромторга.

***Литература***

1. Мякочин Ю. О. 32-разрядный суперскалярный DSP-процессор с плавающей точкой // Компоненты и технологии, 2013. — № 7.

УДК 004.932.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.100.101

# Автоматизация процесса сбора и обработки информации для функционального контроля интегральных микросхем

## Automation of the Process of Collecting and Processing Information for Integrated Circuits Quality Control

**Янакова Е. С.[1,2], Швачко А. А.[1], Белов А. М.[1]**
*[1] АО «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд № 4922, 4, стр. 2*
*secretary@elvees.com*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*helen@elvees.com*

**Yanakova E. S.[1,2], Shvachko A. A.[1], Belov A. M.[1]**
*[1] R&D Center "ELVEES", JSC*
*bld. 2, 4 Lane 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*secretary@elvees.com*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*helen@elvees.com*

Рассмотрены методологические подходы, обеспечивающие повышение эффективности процесса сбора и обработки информации, а также критерии качества результатов оценки сложных интегральных микросхем.
**Ключевые слова:** контроль функционального состояния изделий; гетерогенная СнК; автоматизация контроля качества.

Methodological approaches are considered that provide an increase in the efficiency of the collection and processing process, as well as the quality of the results of the analysis of complex integrated circuits.
**Keywords:** functional control of chips; heterogeneous SoC; quality control automation.

Рост требований к управляемости и стабильности процессов контроля технического и функционального состояния изделий микроэлектроники на разных этапах развития привел к появлению автоматизированных систем и методов управления производством и процессом контроля качества изделий в процессе разработки для достижения требуемых характеристик. Неточности в процессе управления функциональным контролем могут приводить к значительным потерям качества изделий, невозможности достижения заявленных ключевых характеристик. Функциональный контроль качества изготовленного электронного устройства осуществляется путем тестирования и критериального оценивания уровня соответствия номинальным требованиям — эталонным значениям. Стоимость тестирования электронных схем определяется суммой трех компонентов (1):

$$C_{total} = C_{prep} + C_{manuf} + C_{exec}, \quad (1)$$

где $C_{prep}$ — стоимость подготовки теста, $C_{manuf}$ — стоимость производства тестирующей подсхемы, $C_{exec}$ — стоимость выполнения теста. Критерий выбора оптимального тестового решения определяется выражением (2)

$$C_k = \min(C^i_{total}),\ \forall i = 1...N, \quad (2)$$

которое позволяет определить $k$-е решение менее затратным для реализации в проекте ИС с сохранением требуемых показателей покрываемости неисправностей и эффективности тестирования.

Опыт проектирования микропроцессоров НПЦ «ЭЛВИС» [1] показывает, что при выборе стратегии тестирования следует руководствоваться оценкой стоимости внутрисхемного тестирования DFT (Design For Testability) и внешнего функционального тестирования путем контроля знака разностной функции (3):

$$\text{sign}(C_{on_chip} - C_{off_chip}), \quad (3)$$

где $C_{on_chip}$ — оценка стоимости внутрисхемного тестирования DFT; $C_{off_chip}$ — оценка стоимости внешнего тестирования. При большем объеме партии $\text{sign}(C_{on_chip} - C_{off_chip}) < 0$, значит, $C_{on_chip} < C_{off_chip}$. Пример показывает целесообразность использования внутрисхемного тестирования при повышении числа выпускаемых ИС.

Разработанные в АО НПЦ «ЭЛВИС» методы и методики автоматизации процесса сбора и обработки информации (рис. 1) для функционального контроля интегральных микросхем на стадии RTL-модели и применение DFT-подхода в разработке микропроцессоров позволили повысить порог выхода годных микросхем с 40 % при разработке микросхем 2010 года до 70 % при создании микропроцессоров 1892ВМ14Я.

***Литература***

1. Официальный сайт АО НПЦ «ЭЛВИС». URL: https://multicore.ru (дата обращения: 19.07.2020).

УДК 004.056.53 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.102.104

# Аппаратно-программная реализация алгоритма Витерби на базе DSP-ядра Elcore-30MV

## Viterbi Algorithm HW-SW Implementation Using Elcore-30MV DSP Core

**Александров Ю. Н.[1], Беляев А. А.[1,2], Кузнецов Д. А.[1], Петричкович Я. Я.[1], Солохина Т. В.[1], Кучинский А. С.[1], Фролов А. А.[1]**
*[1] АО «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы» 124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд № 4922, 4, стр. 2*
*secretary@elvees.com*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ» 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*bel@elvees.com*

**Alexandrov Y. N.[1], Belyaev A. A.[1,2], Kuznetsov D. A.[1], Petrichkovich Y. Y.[1], Solokhina T. V.[1], Kuchinsky A. S.[1], Frolov A. A.[1]**
*[1] R&D Center "ELVEES", JSC bld. 2, 4 Lane 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*secretary@elvees.com*
*[2] National Research University of Electronic Technology 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*bel@elvees.com*

Дается описание аппаратно-программной реализации алгоритма Витерби на уровне системы инструкций DSP-ядра Elcore-30MV. Рассматриваются возможности поддержки различных режимов декодирования, в том числе турбодекодера. Представлены результаты моделирования алгоритма при различных режимах работы декодера и уровнях искажений передаваемых данных.
**Ключевые слова:** помехоустойчивое кодирование; алгоритм Витерби; декодер Витерби; турбодекодер.

The paper highlights mixed hardware-software implementation of Viterbi algorithm using Elcore-30MV DSP core specialized ISA extension, as well as different decoder operation modes, including turbo decoder mode. Besides, it presents the results of simulation for different decoder modes and different error rates.
**Keywords:** error-correction codes; Viterbi algorithm; Viterbi decoder; turbo decoder.

Алгоритм Витерби [1] широко применяется в современных стандартах беспроводной связи, таких как IEEE 802.11a/g, WiMAX, DAB/DVB, WCDMA, GSM, для декодирования сообщений, закодированных сверточными кодами. Такая востребованность алгоритма Витерби объясняется тем, что сложность его реализации не зависит от длины передаваемой последовательности.

Сверточный кодер и, соответственно, сверточный декодер представляют собой конечный автомат с количеством состояний, равным $2^{K-1}$, где K — длина кодового ограничения (степень порождающего многочлена минус один). Развернутая во времени диаграмма состояний кодера (декодера) называется решетчатой

диаграммой (trellis-диаграммой). С ее помощью выполняется декодирование передаваемой последовательности по алгоритму Витерби. Декодирование Витерби состоит в вычислении метрик правдоподобия двух путей, входящих в каждое состояние, и исключении одного из них. Такие вычисления проводятся для каждого из $2^{K-1}$ состояний в каждый момент времени.

С вычислительной точки зрения для каждого узла решетки выполняется одинаковый набор действий — сложить, сравнить, выбрать (add-compare-select). Вначале для каждого из возможных путей вычисляется обновленная метрика правдоподобия путем сложения накопленной метрики и метрики для данного шага, затем для каждого узла сравниваются метрики двух входящих путей и выбирается тот, что имеет лучшую метрику.

Способы практической реализации алгоритма Витерби в сигнальных процессорах различны. Их можно классифицировать на три группы: программные, аппаратные и смешанные аппаратно-программные.

Поскольку алгоритм Витерби построен на обычных вычислительных операциях, он вполне поддается программной реализации без привлечения дополнительного оборудования, как это было выполнено, например, на сигнальных процессорах семейства TMS320C55x фирмы Texas Instruments [2]. Очевидными недостатками чисто программной реализации являются низкая скорость и высокое энергопотребление в расчете на бит передаваемой информации.

Эти недостатки могут быть устранены при аппаратной реализации алгоритма Витерби в виде специализированного сопроцессора (аппаратного ускорителя). При этом в достаточно широких пределах может быть обеспечена реконфигурируемость основных параметров алгоритма — длины кодового ограничения и относительной скорости кода. Примером такого подхода является сопроцессор декодера Витерби в составе сигнальных процессоров другого семейства фирмы Texas Instruments — TMS320C6474 [3]. Однако аппаратный подход имеет свои недостатки: во-первых, он требует довольно значительных дополнительных аппаратных затрат; во-вторых, программирование системы в целом усложняется за счет необходимости организации взаимодействия и синхронизации основного процессорного ядра и сопроцессора (ускорителя), включая подкачку/отгрузку данных, проверку флагов и т. п.

Смешанный аппаратно-программный подход состоит в том, что для поддержки алгоритма Витерби в систему инструкций процессора вводится специализированное расширение. Это также требует определенных аппаратных издержек, но, как правило, меньших, чем при втором подходе. Примером реализации такого смешанного подхода является процессор ADSP-TS201 TigerSHARC фирмы Analog Devices [4]. В составе этого процессора имеется специализированное вычислительное устройство CLU (Communications Logic Unit), и для работы с этим устройством в систему инструкций процессора введен соответствующий блок команд. Однако реализованное в TigerSHARC решение, тем не менее, остается достаточно сложным: дополнительный блок инструкций содержит целых 19 команд, а само устройство CLU содержит регистровый файл из 32 регистров для хранения метрик путей и набор дополнительных регистров.

Примененное в DSP-ядре Elcore-30MV решение является значительно более простым: в систему инструкций DSP-ядра введены всего лишь две дополнительных команды, которые к тому же работают с регистрами общего назначения и не

требуют обращений к специальным регистрам. Эти две команды взаимодействуют со специализированным вычислительным устройством, выполняющим процедуру add-compare-select над векторами, содержащими 8 16-разрядных метрик. Конфигурирование вычислений выполняется с помощью входящего в состав DSP-ядра регистра специальных функций SFR. Параметры выполняемых алгоритмов Витерби и турбодекодирования могут регулироваться в достаточно широких пределах: относительная скорость может принимать значения r = 1/2, 1/3, 1/4; а длина кодового ограничения K = 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Контроль правильности выполнения алгоритма Витерби в рамках предложенной аппаратно-программной реализации был проведен путем моделирования в различных режимах работы с использованием специализированных тестов BDTI [5]. Моделирование показало полное соответствие полученных результатов теоретическим расчетам.

***Литература***

1. Витерби А.Д., Омура Дж. К. Принципы цифровой связи и кодирования / Пер. с англ. под ред. Ш. Зигангирова. — М.: Радио и связь, 1982. — 536 с.
2. Viterbi Decoding Techniques for the TMS320C55x DSP Generation. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.ti.com/lit/an/spra776a/spra776a.pdf (дата обращения: 16.07.2021).
3. TMS320C6474 DSP Viterbi-Decoder Coprocessor 2 (VCP2) User's Guide. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.ti.com/lit/ug/sprug20b/sprug20b.pdf?ts=1591773098751 (дата обращения: 16.07.2021).
4. ADSP-TS201 TigerSHARC® Processor Programming Reference — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.analog.com/media/en/dsp-documentation/processor-manuals/34605284816196ts201_pgr.pdf (дата обращения: 16.07.2021).
5. BDTI DSP Kernel Benchmarks™ — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.bdti.com/services/bdti-dsp-kernel-benchmarks (дата обращения: 16.07.2021).

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.105.106

# Схема автоматической коррекции асимметрии сигнала в линиях мультиплексного канала обмена

## Scheme for Automatic Correction of Signal Asymmetry in the Lines of a Multiplex Data Bus

**Еремеев П. М., Молодых Ю. В.**
*АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2*
*eremeevpm@mail.ru, j.molodykh.sm@gmail.com*

**Eremeev P. M., Molodykh Y. V.**
*Submicron Scientific Research Institute JSC*
*bld. 2, 5 Georgievsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460*
*eremeevpm@mail.ru, j.molodykh.sm@gmail.com*

В статье рассмотрена реализация схемы автоматической коррекции сигнала в линиях мультиплексного канала обмена ГОСТ Р 52070-2003, обеспечивающая выполнение требований по симметрии сигнала при интенсивных обменах в тракте передачи данных.
**Ключевые слова:** мультиплексный канал передачи данных; ГОСТ Р 52070-2003; остаточное напряжение.

The article considers the implementation of the automatic signal correction scheme in the lines of the multiplex data bus MIL STD 1553b, which ensures the fulfillment of the requirements for signal symmetry during intensive exchanges in the data bus.
**Keywords:** multiplex data bus; MIL STD 1553b; tail-off.

Мультиплексный канал передачи данных (далее по тексту МКПД) по ГОСТ Р 52070-2003 [1], являющийся аналогом зарубежного стандарта MIL STD 1553b, широко используется в отечественных и зарубежных системах управления различными объектами военной и гражданской техники более 30 лет и продолжает находить применение в новых разработках и при модернизации существующих образцов РЭА.

Одной из типовых проблем при проектировании устройств МКПД является обеспечение симметрии выходного сигнала. Интегральным показателем симметрии выходного сигнала является остаточное напряжение, измеряемое в магистрали МКПД через 2,5 мкс после пересечения нулевого уровня серединой сигнала последнего перед паузой разряда слова, рис. 1. Остаточное напряжение $U_{ост}$ не должно превышать ±90 мВ для непосредственного подключения к магистрали МКДП, показанного на рис. 1.

Остаточное напряжение возникает из-за остаточной магнитной индукции в трансформаторе гальванической развязки Тр передатчика, вызванной асимметрией передаваемого сигнала. При интенсивных обменах остаточная магнитная индукция не успевает рассеяться в паузах между сообщениями и остаточное напряжение начинает возрастать с каждым новым сообщением. Вследствие этого могут иметь место сбои при передаче информации даже для изделий, полностью протестированных в соответствии с [2]. Таким образом, разработка схемы

автоматической коррекции асимметрии сигнала в линиях мультиплексного канала обмена является весьма актуальной задачей.

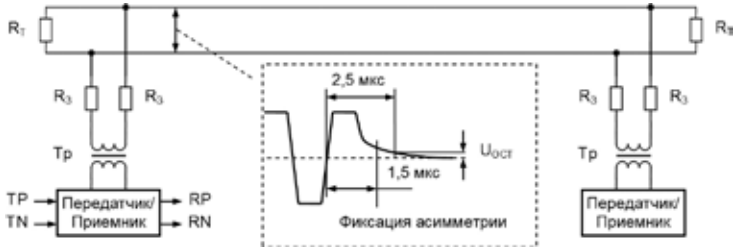



**Рис. 1.** Схема непосредственного подключения к МКПД и измерения $U_{ост}$

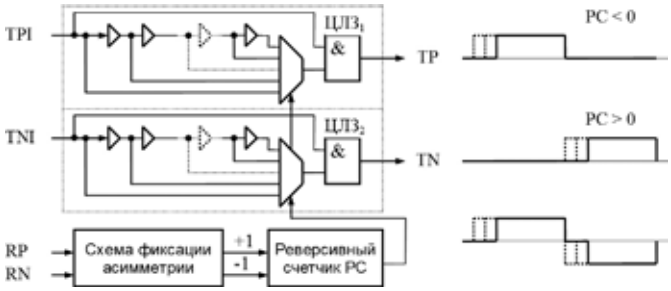



**Рис. 2.** Схема автоматической коррекции асимметрии сигнала

Авторами предложена схема автоматической коррекции, показанная на рис. 2.

Схема автоматической коррекции асимметрии сигнала содержит две цифровые линии задержки $ЦЛЗ_1$, $ЦЛЗ_2$, схему фиксации асимметрии и реверсивный счетчик. Цифровые линии задержки подключаются к цифровым входам передатчика МКДП TP, TN. ЦЛЗ предназначены для управляемого сдвига переднего фронта положительной фазы сигнала ($ЦЛЗ_1$) или отрицательной фазы сигнала ($ЦЛЗ_2$). Схема фиксации асимметрии подключается к цифровым выходам приемника МКДП RP, RN.

ЦЛЗ корректируют длительность положительной или отрицательной фазы сигнала, выдаваемого в МКДП, на основе обратной связи от схемы фиксации асимметрии.

Предложенная схема была реализована на FPGA в составе прибора ЦВМ201-1 разработки АО «НИИ «Субмикрон», имеющего шесть резервированных МКПД, и показала свою эффективность.

***Литература***

1. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей.
2. ГОСТ Р 52074-2003. Тестирование серийных образцов интерфейсных модулей, функционирующих в режиме контроллера шины.

УДК 681.513.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.107.108

# Конструктивные и технологические решения создания универсальной модульной платформы управления приводами, различными типами электрических двигателей, подвижными механизмами

## Constructive and Technological Solutions to Create the Universal Modular Drive Control Platform with Various Types of Electric Motors and Mobile Mechanisms

**Шаймарданова О. Р.[1], Воробьев В. М.[2]**
*[1] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Shaymardanova O. R., Vorob'yev V. M.**
*[1] Zelenograd Nanotechnology Center JSC*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Рассмотрены конструктивно-технологические решения создания конфигурируемой адаптивной модульной платформы управления приводами, различными типами электрических двигателей, подвижными механизмами. Описаны новые конструктивно-технологические решения для систем управления электродвигателями, включающие сменные реконфигурируемые типы модулей и блоков как составных элементов системы. Приведено описание методов оптимизации архитектуры модульных систем, решений по кастомизации элементов платформы под задачи пользователя за счет конфигурирования элементов платформы под задачи пользователя.

**Ключевые слова:** цифровая платформа; управление электрическими двигателями; контроллер; электропривод; электродвигатель; энкодер; силовая электроника; силовые ключи.

Разрабатываемая платформа предназначена для управления приводами и двигателями различной мощности и различного типа, такими как двигатели постоянного тока — коллекторные, бесколлекторные, вентильные, двигатели переменного тока — синхронные и асинхронные, шаговые двигатели; двигатели могут быть одно, двух и трехфазными. За счет своей универсальности платформа может применяться практически везде, где используются электродвигатели.

Ключевой особенностью предлагаемого решения является возможность конфигурации платформы на основе рекомендаций разрабатываемого в ходе проекта программного обеспечения интеллектуальной системы поддержки принятия решений под конкретную задачу заказчика, что позволяет не закладывать в стоимость изделия дополнительные функции и тем самым оптимизировать затраты как на производство готовой продукции, так и на разработку.

Указанная оптимизация возможна посредством получения из системы поддержки принятия решений конкретного набора типов печатных плат, комплектующих и программ управления, наилучшим образом подходящих для задачи заказчика.

Универсальность системы управления электродвигателями, приводами и подвижными механизмами обеспечивается за счет реконфигурируемых типов модулей, включая модуль управляющего MCU и интерфейсы питания и внешнего управления, модуль вторичного питания, возможность подключения различных типов датчиков физических величин, модули силовых ключей.

Специальное встроенное программное обеспечение по интеграции модулей в платформу обеспечивает возможность перенастройки и программно-аппаратного конфигурирования платформы, адаптации системы под задачи пользователя.

Используемая адаптивная конфигурация платформы управления приводами различных типов электрических двигателей, подвижными узлами и механизмами позволяет оптимизировать набор силовых элементов управления двигателями в широком диапазоне мощностей (от 0,1 Вт до 100 Вт) и модули обратной связи от различных типов датчиков физических величин под конкретные задачи производителей аппаратуры и систем управления гражданского назначения.

Актуальность и преимущества данного технологического решения:

- универсальность и совместимость с электрическими двигателями различных типов, работающих в диапазоне мощностей от 0,1 Вт до 10 кВт;
- модульный принцип построения универсальной цифровой платформы управления приводами различных типов электрических двигателей, подвижными платформами и роботизированными комплексами, узлами и механизмами;
- адаптивное конфигурирование программного обеспечения адаптивного блока управления с возможностью интеграции интерфейса под стандартные операционные системы (Windows, Android, др.);
- высокая точность управления двигателями и позиционированием объектов за счет инновационных алгоритмов управления.

Оптимизация управления электродвигателями, применение инновационных алгоритмов на основе пространственно-векторной модуляции, заложенные на стадии проектирования, позволят уменьшить непроизводительные затраты электроэнергии в 1,3–1,6 раза и повысить энергоэффективность на 10–15 % при снижении себестоимости по сравнению с импортными аналогами в 1,5–2 раза.

Реализация предлагаемого проекта будет способствовать снижению зависимости от импортных поставщиков комплектующих продукции, а также позволит создать на территории Российской Федерации высокотехнологичное производство интеллектуальной цифровой модульной платформы управления, превосходящей по своим характеристикам зарубежные аналоги. Будет обеспечено развитие научного и технологического потенциала российских компаний в области разработки и производства систем управления двигателями, приводами и механизмами.

Предлагаемое конфигурируемое решение подключения по модульному принципу необходимых силовых ключей и датчиков в сочетании с оригинальной архитектурой интеллектуальной системы поддержки принятия решений обеспечивает удобство кастомизации для производителей радиоэлектронной продукции и, безусловно, найдут широкое применение в промышленной автоматизации, робототехнике и машиностроении.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.109.110

# Информационно-управляющая система для лечения пациентов с нарушениями функции гортани

## Information and Control System to Cure Patients with Impaired Larynx Function

**Телышев Д. В.[1,2], Нестеренко И. В.[1], Бочков А. А.[1], Мамекин К. А.[1]**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*telyshev@bms.zone*
*[2] ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России» (Сеченовский университет)*
*119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*

**Telyshev D. V.[1,2], Nesterenko I. V.[1], Bochkov A. A.[1], Mamekin K. A.[1]**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*telyshev@bms.zone*
*[2] Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)*
*8/2 Trubetzkaya St., Moscow, 119991, Russia*

Разработана новая информационно-управляющая система для обеспечения спонтанного дыхания при парезе голосовых связок с помощью прямой электрической стимуляции задней перстнечерпаловидной мышцы.
**Ключевые слова:** электромиография; функциональная электростимуляция; стимулятор гортани; имплантируемое медицинское устройство.

На сегодняшний день одним из новаторских экспериментальных вариантов лечения паралича голосовых связок является прямая электрическая стимуляция [1, 2] задних перстнечерпаловидных мышц (ЗПМ). ЗПМ получают иннервацию через возвратный гортанный нерв (ВГН), поэтому повреждение ВГН может привести к тому, что голосовая щель постоянно будет находиться в приведенном состоянии. Некоторые хронические исследования на животных и людях показывают эффективность электрической стимуляции в восстановлении подвижности парализованных мышц гортани [3, 4]. Электрическая стимуляция ЗПМ человека вызывает раскрытие голосовой щели в гортани и обеспечивает вентиляцию в случае двустороннего паралича голосовых связок [5].

Основной целью настоящей работы является исследование зависимости степени расширения голосовой щели от амплитуды/частоты подаваемой электрической стимуляции. Для этих целей был разработан стимулятор нерва гортани с возможностью приема ЭМГ, беспроводной связью и встроенным источником питания. Этот прибор позволяет производить биполярную стимуляцию одиночными импульсами или последовательностью импульсов произвольной формы, которые могут быть синхронизированы с сигналом канала ЭМГ или генерироваться на постоянной частоте. Это будет способствовать синхронному открытию голосовой щели в начале фазы вдоха дыхательного цикла и может быть использовано в качестве метода лечения пациентов с параличом голосовых связок (ПГС). Этот метод может стать ключевым в клинической

практике для улучшения качества жизни пациентов, страдающих ПГС, и снижения инвалидности и смертности.

Для проведения этого исследования мы разработали малогабаритное устройство с питанием от литиевого элемента питания, которое позволяет одновременно генерировать произвольные импульсы стимуляции и регистрировать биопотенциалы. Структурная схема устройства показана на рис. 1.

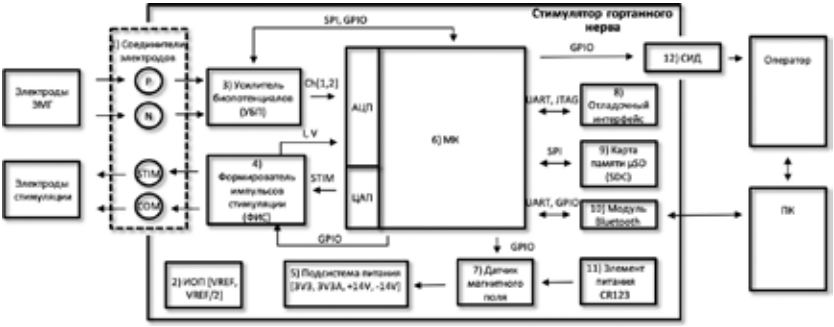



**Рис. 1.** Структурная схема проектируемого устройства и его соединений

Результаты настоящего исследования открывают широкие возможности реализации новых идей в области реиннервации мышц гортани. Однако будущие исследования должны решить ряд технических инженерных задач, таких как разработка операционного инструмента для установки электродов, оценка степени коррозии электродов с последующей разработкой более инертных и биосовместимых материалов электродов. Также важной перспективной задачей является разработка алгоритма выделения полезного сигнала синхронизации для сокращения ЗПМ из сигнала ЭМГ, снимаемого с межреберного или диафрагмального нерва, что является необходимым шагом для трансляции этой технологии на следующие уровни на пути к получению безопасного и эффективного терапевтического инструмента.

***Литература***

1. Labuschagne J. J. and Hammer N. Intra-Operative Detection of a Left-Sided Non-Recurrent Laryngeal Nerve during Vagus Nerve Stimulator Implantation // Medicina (B. Aires). 2020. 56 (10). P. 489.
2. Shon A., Chu J.-U., Jung J., Kim H. and Youn I. An Implantable Wireless Neural Interface System for Simultaneous Recording and Stimulation of Peripheral Nerve with a Single Cuff Electrode // Sensors, 2017. 18 (2). P. 1.
3. Mueller A. H. Laryngeal Pacing for Bilateral Vocal Fold Immobility. Curr. Opin. // Otolaryngol. Head Neck Surg., 2011. 19 (6). P. 439–443.
4. Targan R. S., Alon G. and Kay S. L. Effect of Long-Term Electrical Stimulation on Motor Recovery and Improvement of Clinical Residuals in Patients with Unresolved Facial Nerve Palsy // Otolaryngol. Neck Surg., 2000. 122 (2). P. 246–252.
5. Zealear D. L., Billante C. R., Courey M. S., Netterville J. L., Paniello R. C., Sanders I., Herzon G. D., Goding G. S., Mann W., Ejnell H., Habets A. M. M. C., Testerman R. and Van de Heyning P. Reanimation of the Paralyzed Human Larynx With an Implantable Electrical Stimulation Device // Laryngoscope, 2003. 113 (7). P. 1149–1156.

УДК 621.375 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.111.112

# Методы проектирования систем беспроводного питания электронных имплантатов

## Design Methods of the Electronic Implants Wireless Power Supply Systems

**Данилов А. А.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*constantinegurov@yandex.ru*

**Danilov A. A.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*constantinegurov@yandex.ru*

Рассмотрены основные методы проектирования систем беспроводного питания электронных имплантатов. Показано, что наиболее перспективным является подход, основанный на использовании сложных целевых функций и автоматизированного проектирования.

**Ключевые слова:** чрескожная передача энергии; индуктивная связь; имплантируемая электроника.

В настоящее время большое внимание уделяется развитию беспроводного питания имплантируемых медицинских приборов (ИМП). Использование таких технологий позволяет снизить риск развития послеоперационных осложнений, уменьшить габариты имплантата и стоимость лечения. Наиболее широко при этом используют индуктивную связь с рабочей частотой в пределах от 100 кГц до 13,56 МГц. Типичные габариты приемной и передающей катушек — 1–10 см, расстояние передачи энергии — 0,5–3 см. Системы беспроводного питания могут использоваться для энергообеспечения ИМП с различной потребляемой мощностью (от 100 мкВт до 10 Вт) и в двух различных режимах: периодической (раз в несколько дней) подзарядки имплантируемого аккумулятора и непрерывного питания ИМП. Разработка методов и средств беспроводного питания ИМП относится к числу ключевых проблем развития современной электроники медицинского назначения.

Основными проблемами проектирования являются выбор целевых функций (критериев качества) и разработка формальных методов проектирования, позволяющих решать задачи создания систем беспроводного питания ИМП в автоматическом или автоматизированном режимах. Следует заметить, что исторически первым и по сей день популярным является выбор простых целевых функций, в первую очередь эффективности передачи энергии. Этот подход связан с рядом недостатков постольку, поскольку рост эффективности передачи энергии после достижения определенного (пикового) значения мощности на нагрузке ведет к уменьшению последней величины вплоть до нуля при приближении эффективности к 100 %.

Более перспективным является использование сложных функций, представляющих собой комбинацию нескольких показателей. Такими показателями могут

быть номинальный уровень мощности на нагрузке и допустимый уровень перепада мощности на нагрузке [1]; произведение мощности на нагрузке и эффективности передачи энергии с различными показателями степени [2] или комбинация «эффективность передачи энергии — плотность мощности источника» [3]. Использование комбинированных целевых функций существенно повышает качество проектирования систем, поскольку полученный результат обеспечивает решение сразу нескольких задач проектирования (обеспечение заданных мощностных характеристик, габаритов, тепловой безопасности и пр.).

***Работа выполнена в рамках государственного задания (соглашение № 075-03-2020-216 от 27.12,2019 г.).***

***Литература***

1. Danilov A. A., Aubakirov R. R., Mindubaev E. A., Gurov K. O., Telyshev D. V., Selishchev S. V. An Algorithm for the Computer Aided Design of Coil Couple for a Misalignment Tolerant Biomedical Inductive Powering Unit // IEEE Access, 2019. Vol. 7. P. 70755–70769.
2. Kiani M., Ghovanloo M. A figure-of-merit for designing high-performance inductive power transmission links // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021. Vol. 60. № 11. P. 5292–5305.
3. Bosshard R., Kolar J. W., Mühlethaler J., Stevanović I., Wunsch B. Canales F. Modeling and η-α-Pareto optimization of inductive power transfer coils for electric vehicles // IEEE Transactions on Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015. Vol. 3. № 1. P. 50–64.

УДК 621.371 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.113.114

# Разработка макета системы беспроводной передачи энергии к имплантируемому миниатюрному роторному насосу крови

## Layout Development of a Wireless Energy Transmission System to an Implantable Miniature Blood Pump

**Миндубаев Э. А.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*edmindubaev@gmail.com*

**Mindubayev E. A.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*edmindubaev@gmail.com*

Разработан макет системы беспроводной передачи энергии к имплантируемому миниатюрному роторному насосу крови. Выполнена оптимизация блоков системы: усилителя мощности, выпрямителя, пары связанных колебательных контуров и геометрии катушечной пары. Выходная мощность разработанного макета составила 10 Вт.

**Ключевые слова:** чрескожная передача энергии; индуктивная связь; насос крови.

Устоявшимся подходом к энергообеспечению имплантируемых насосов крови является передача энергии от внешнего источника питания к имплантируемой части устройства по проводам, проходящим через кожу [1]. Подобный метод энергообеспечения является простым и надежным. В то же время он обладает рядом недостатков, которые связаны со спецификой применения. В месте прохождения проводов могут развиваться инфекции, которые представляют угрозу жизни пациента [2]. Кроме того, эксплуатация системы с чрескожным каналом подразумевает ограничение некоторых базовых активностей пациента, таких как, например, прием полноценного душа.

Альтернативой чрескожным проводам являются системы беспроводного энергообеспечения. Для работы насосов крови необходима значительная мощность, которая может достигать десятков ватт. В связи с этим единственным подходящим методом беспроводной передачи энергии является индуктивная связь.

Был разработан макет системы беспроводной передачи энергии на основе индуктивной связи к имплантируемому миниатюрному роторному насосу крови. В ходе проектирования был решен ряд научно-технических задач:

- выбор усилителя мощности в передающей части системы;
- выбор выпрямителя в принимающей части системы;
- оптимизация пары индуктивно связанных колебательных контуров;
- оптимизация геометрии катушечной пары.

Внешний радиус передающей катушки индуктивности в разработанном макете составляет 35 мм. Внешний радиус имплантируемой катушки индуктивности — 22,5 мм. Выходная мощность разработанного макета достигает 10 Вт.

***Работа выполнена в рамках государственного задания (соглашение № 075-03-2020-216 от 27.12,2019 г.).***

***Литература***

1. Anastasiadis K. Mechanical support of the circulatory system // Hellenic Journal of Cardiology, 2003. № 44. P. 341–347.
2. Wang J. X., Smith J. R., Bonde P. Energy transmission and power sources for mechanical circulatory support devices to achieve total implantability // Annals of Thoracic Surgery, 2014. V. 97. P. 1467–1474.

УДК 537.533.9 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.115.116

# Сложно-функциональные блоки для проектирования СнК в области информационно-управляющих и радиотехнических систем

## IPs for Designing of SoC in the Field of Information Control and Radio Engineering Systems

**Шипицин Д. С., к. ф.-м. н., Бутов А. А., Шокарев Б. А.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dshipitsin@niime.ru, abutov@niime.ru, bshokarev@niime.ru*

**Shipitsin D. S., Ph.D, Butov A. A., Shokarev B. A.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dshipitsin@niime.ru, abutov@niime.ru, bshokarev@niime.ru*

Разработан комплект СФБ для использования в СнК в области информационно-управляющих и радиотехнических систем. Приведены характеристики СФБ. Описано окружение для прототипирования и валидации СФБ.
**Ключевые слова:** СФ; IP; USB3.0; SATA; PCIe; MIPI; Gigabit Ethernet; PLL; LVDS; СнК.

A set of IPs has been developed for use in the SoC in the field of information control and radio engineering systems. The characteristics of the IPs have been given. An environment for prototyping and validating IPs has been described.
**Keywords:** IP; USB3.0; SATA; PCIe; MIPI; Gigabit Ethernet; PLL; LVDS; SoC.

Инфокоммуникационные технологии являются одними из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники [1]. Анализ долгосрочных перпектив, основанных на мировых тенденциях развития, показывает возрастающий рост потребности в таких системах, повышении их характеристик, качества, надежности.

Для обеспечения потребностей разработчиков систем, повышения качества систем и снижения сроков вывода на рынок важной задачей является создание баблиотек баз данных СФ-блоков. [2] Разработка СФ-блоков для информационно-управляющих и радиотехнических систем в контексте инфокоммуникационных технологий предполагает в первую очередь реализацию высокоскоростных интерфейсов передачи данных: Ethernet 1/40/100 Gbit/s, PCIe gen3, 4, 5, SATA ver.3.x, USB 3.x и пр. Отдельно следует отметить важность исследований и разработки в области СФ-блоков запоминающих устройств — RAM, ROM, FLASH и пр. [3]

В рамках активных ОКР в АО «НИИМЭ» выполнены и ведутся разработки цифровых и смешанных СФ-блоков для обеспечения потребности разработчиков систем разных уровней — от датчиков (различные низкоскоростные последовательные цифровые интерфейсы) и микроконтроллерных систем (набор системных блоков микроконтроллерной системы: счетчики, таймеры, DMA, RTC и пр., контроллеры периферифных интерфейсов: SPI, UART, JTAGdebug, GPIO и пр.) до сложных процессорных систем (СФ-блоки высокоскоростных интерфейсов:

PCIe gen3, SATA 3.0, USB3.0, MIPI CSI/DCI, Gigabit Ethernet). Обязательным этапом разработки является прототипирование с использованием FPGA, позволяющее значительно снизить риски при разработке самих СФ-блоков, а также отработать взаимодействие с СФ-блоком в составе системы.

На этапах разработки, прототипирования и производства выполняется контроль соответствия параметров СФ-блоков требованиям стандартов с применением специализированных КИА — анализаторов протоколов. С их помощью контролируется соответствие физических параметров сигналов интерфейсов, а также функциональной логической нагрузки, протоколов разных уровней с прохождением аттестационных тестов (compliance tests).

Для поддержки разработчиков, ведущих проектирование СнК для различных применений, идет формирование реестра СФ-блоков, обеспечивающего основные потребности в части формирования тактовых сигналов [5], источников опорного напряжения [6], энергонезависимой памяти [3, 4] и проч. СФ-блоки охватывают широкую линейку технологий, включающую в себя КМОП на объемном кремнии с нормами до 90 нм, а также КНИ с нормами 180–90 нм.

***Литература***

1. Электронный ресурс: http://www.kremlin.ru/supplement/987.
2. Бочаров Ю. И., Гуменюк А. С., Симаков А. Б., Шевченко П. А. Проектирование БИС класса «система на кристалле»: Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008. — 188 с.
3. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
4. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2011.
5. Behzaf Razavi. Design of Analog CMOS Integrated Circuits 2001.
6. Garth Nash. Phase-Locked Loop Design Fundamentals 2007.

УДК 004.42 + 004.8 + 004.31 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.117.118

# К вопросу создания интеллектуальной децентрализованной энергонакопительной системы

## On the Issue of Creating an Intelligent Decentralized Energy Storage System

**Лустгартен М. Ю.[1,2], Собченко М. И.[1,2], Ухандеев В. И.[1,2]**
*[1] АО «Научно-технический центр ЭЛИНС»*
*124480, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 4, стр. 1*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*marklustgarten@yandex.ru*

**Lustgarten M. Y.[1,2], Sobchenko M. I.[1,2], Ukhandeev V. I.[1,2]**
*[1] "STC ELINS" JSC*
*bld. 1, 4 Panfilovskiy Ave., Zelenograd, Moscow, 124480*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*marklustgarten@yandex.ru*

В статье рассмотрены подходы к управлению энергетическими системами с помощью нейронных сетей. Предложен подход к управлению балансировкой аккумуляторов. Приведена архитектура масштабируемого энергонакопительного модуля.
**Ключевые слова:** управление; масштабируемая система; балансировка аккумуляторов; нейронные сети; обучение с подкреплением.

The article discusses approaches to managing energy systems using neural networks, proposes an approach to managing battery balancing, and presents the architecture of a scalable energy storage module.
**Keywords:** power management; scalable energy storage; battery balancing; neural networks; reinforcement learning.

Разбалансировка заряда отдельных батарей — часто встречающаяся проблема в системах, состоящих из группы последовательно включенных аккумуляторов.

Деградация батарей ускоряется из-за перегрева и перезаряда, что усложняет их длительную эксплуатацию. Поэтому важно, используя программно-аппаратные решения, контролировать процесс разбалансировки.

При рассмотрении вопроса балансировки аккумуляторов одной из ключевых проблем является жесткая привязка конфигурации существующих специализированных плат к количеству контролируемых аккумуляторов, что делает системы с использованием подобных решений сложномасштабируемыми.

В ходе работы был проведен анализ существующих решений по контролю заряда аккумуляторных систем. Выделены их преимущества и недостатки. На сегодняшний день в свободном доступе существует решение подобной проблемы от компании Tesla. Изделия Powerwall имеют высокую стоимость и по ряду причин не могут применятся в отечественных специализированных продуктах.

На сегодняшний день большинство решений, позволяющих осуществлять масштабирование системы, имеют централизованную структуру, т. е. управление системой осуществляется одним специальным модулем, от которого зависит работоспособность всей системы.

Предложено программно-аппаратное решение на основе нейронных сетей, позволяющее осуществлять балансировку различного количества батарей без внесения схемотехнических или программных изменений. Выделены этапы, позволяющие провести оптимизацию предложенного алгоритма.

Результатом работы является структурная схема электротехнической составляющей энергонакопительного модуля и алгоритм его функционирования. Объединение нескольких модулей позволит получить законченную энергонакопительную систему.

Переход к децентрализованной структуре позволит повысить показатели надежности системы даже при относительно меньшей надежности отдельно взятых блоков, чем у эквивалентной централизованной системы.

Рассмотренный подход позволит создавать системы питания под различные задачи, используя объединение нескольких модулей, состоящих из схемотехнически одинаковых элементарных блоков, что значительно уменьшит время и стоимость разработки систем питания для конкретных изделий.

УДК 621.376.6 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.119.121

# Диагностика исправности дистанционных измерителей параметров движения объектов устройствами встроенного контроля

## Diagnostics of Serviceability of Remote Objects Movement Meters with Built-in Control Devices

**Медеев Д. А.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*medeev-dima@rambler.ru*

**Medeev D. A.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*medeev-dima@rambler.ru*

Рассматриваются способы построения и устройства систем самодиагностики исправности дистанционных измерителей параметров движения.
**Ключевые слова:** диагностика исправности; имитационный сигнал; модуляция.

The paper presents methods of construction and devices of self-diagnostic systems of serviceability of remote motion parameters meters.
**Keywords:** serviceability diagnostics; simulation signal; modulation.

В радиолокационном измерителе параметров движения объектов обычно используются оптимальные приемники [1]. Одной из основных задач оптимального приемника является оценка параметров поступившего на вход сигнала. Реализация входного напряжения приемника позволяет определить значение одного или нескольких параметров сигнала, таких как амплитуда, частота, фаза или время запаздывания.

Диагностика исправности проходит путем формирования внутри устройства имитационного сигнала и измерения его амплитуды и частоты, полученной с выхода фильтра. Формирование такого имитационного сигнала можно выполнить следующими способами: частотным сдвигом, амплитудной модуляцией, временной задержкой высокочастотного сигнала (ВЧ-сигнала).

Частотный сдвиг в современных устройствах можно получить на миниатюрных квадратурных I/Q-модуляторах путем изменения несущего ВЧ-сигнала. Сигнал модуляции формируется из суммы двух модулирующих сигналов I и Q, где I — синфазная составляющая, а Q — квадратурная составляющая [2]. Модулированный ВЧ-сигнал генерируется путем сложения несущей, модулированной синфазной составляющей I(t), и несущей, модулированной квадратурной составляющей Q(t) со сдвигом фазы 90°. Такое решение позволяет легко реализовать частоту имитационного сигнала.

Амплитудная модуляция — это наиболее простой способ изменения несущего ВЧ-сигнала. Получение амплитудной модуляции в радиолокационных

устройствах сводится к воздействию модулирующим напряжением на усилитель выходной мощности [3].

Задержку ВЧ-сигнала в качестве индикатора исправности дистанционного измерителя возможно применить только в радиолокационных системах с частотной модуляцией (ЧМ). В качестве задерживающего ВЧ-сигнал устройства применяется линия задержки на поверхностных акустических волнах (ЛЗ ПАВ) [4]. В данном случае ЛЗ ПАВ имитирует дальность до объекта и обратно путем внесения дополнительной задержки без излучения в пространство между передающим и приемным трактом. Такая схема дает приращение несущей частоты пропорционально времени задержки сигнала.

Представленные способы построения внутренних диагностических устройств позволяют проводить высокоэффективный контроль исправности дистанционных измерителей параметров объектов как на этапах производства, так и в процессе эксплуатации.

***Литература***

1. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. В 2 томах. Том 2 / Под ред. Б.Х. Кривицкого. — М.: Энергия, 1977. — 472 с.
2. Модуляция и формирование сигналов с помощью генераторов сигналов компании R&S. Обучающие материалы [Электронный ресурс] // URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma225/1MA225_1rus_Modulation_Signal_Generation.pdf (дата обращения: август 2021).
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1986. — 512 с.
4. Бугаев А.С., Дмитриев В.Ф., Кулаков С.В. Устройства на поверхностных акустических волнах: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2009. — 188 с.

Optimal receivers are usually used in the radar motion parameters meter [1]. One of the main tasks of the optimal receiver is to estimate the parameters of the input signal. The realization of the receiver input voltage allows determining the value of one or more signal parameters, such as amplitude, frequency, phase or lag time.

Fault diagnosis takes place by forming a simulated signal inside the device and measuring its amplitude and frequency obtained from the filter output. The formation of such a simulated signal can be performed by the following methods: frequency shift, amplitude modulation, time delay of the high-frequency signal (HF signal).

Frequency shift in modern devices can be obtained on miniature quadrature I/Q modulators by changing the carrier RF signal. Modulation signal is formed from the sum of two modulating signals I and Q, where I is in-phase component and Q is quadrature component [2]. Modulated RF signal is generated by adding the carrier modulated in-phase component I(t) and the carrier modulated quadrature component Q(t) with a phase shift of 90°. This solution makes it easy to realize the frequency of the simulated signal.

Amplitude modulation is the easiest way to change the carrier RF signal. Obtaining amplitude modulation in radar devices is reduced to the impact of modulating voltage on the output power amplifier [3].

Delayed HF signal as an indicator of serviceability of a remote meter can be applied only in radar systems with frequency modulation (FM). As a delaying HF signal, a delay line on surface acoustic waves (DL SAW) is used [4]. In this case DL SAW simulates the range to and from the object by introducing an additional delay without radiation in the space between the transmitting and receiving paths. Such a scheme gives an increment of the carrier frequency proportional to the signal delay time.

The presented construction methods of internal diagnostics devices allow carrying out highly effective control of serviceability of remote object parameters measuring devices both at the stages of production and in the process of operation.

***References***

1. Reference book on theoretical foundations of radioelectronics. In 2 volumes. Vol. 2 / Edited by B. Kh. — Moscow: Energia, 1977. 472 p.
2. Modulation and signal shaping with R&S signal generators, Teaching materials [Electronic resource] // URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma225/1MA225_1rus_Modulation_Signal_Generation.pdf (accessed August 2021).
3. Gonorovsky I. S. Radio circuits and signals: a textbook for high schools. — 4th edition, revised and extended. M.: Radio and Communications, 1986. 512 p.
4. Bugaev A. S., Dmitriev V. F., Kulakov S. V. Surface Acoustic Wave Devices: Textbook. SPb.: GUAP, 2009. 188 p.

УДК 621.396.96 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.122.123

# Бортовые радиолокационные информационно-управляющие системы: современное состояние и направления развития

## Side Radar Information Control Systems: Modern State and Development Trends

**Антипов В. Н., д. т. н., Колтышев Е. Е., д. т. н., Медуницин Н. Б., д. т. н., Сусляков Д. Ю., Фролов А. Ю., д. т. н., Янковский В. Т., д. т. н.**
*АО «НИИП имени В. В. Тихомирова»*
*140180, г. Жуковский, ул. Гагарина, 3*
*A.frolov@niip.ru*

**Antipov V. N., Sc.D, Koltyshev Ye. Ye., Sc.D, Medunitsin N. B., Sc.D, Suslyakov D. Yu., Frolov A. Yu., Sc.D, Yankovskiy V. T., Sc.D**
*Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design JSC*
*3 Gagarina St., Zhukovskiy, 140180*
*A.frolov@niip.ru*

Рассмотрены состояние и направления развития аппаратуры и программно-алгоритмического обеспечения современных бортовых радиолокационных информационно-управляющих систем.

**Ключевые слова:** информационно-управляющие системы; бортовые радиолокационные системы.

Боевая эффективность современных и перспективных летательных аппаратов во многом зависит от тактико-технических характеристик бортовых радиолокационных систем (БРЛС), выполняющих функции информационного обеспечения и управления оружием. БРЛС являются единственным средством ведения воздушного боя и уничтожения наземных (морских) целей на больших дальностях в любых метеоусловиях с использованием неуправляемого и управляемого оружия с различными головками самонаведения.

Современные БРЛС являются многофункциональными и имеют режимы обнаружения и сопровождения воздушных целей, картографирования местности, комбинированный режим обзора воздушного пространства и земной поверхности, а также специальные, снабжающие летчика информацией о помеховой и метеорологической обстановке и обеспечивающие направленный прием и передачу данных, решение навигационных задач. Для снижения нагрузки на пилота процессы обнаружения и распознавания целей максимально автоматизированы [1]. Примерами таких БРЛС являются APG-70, APG-82 (США) и Н-135, Н-121 (Россия).

Отличительной особенностью современных БРЛС является их потенциал по модернизации. Эта возможность обеспечивается за счет модульного построения и открытой архитектуры аппаратуры и программного обеспечения (ПО). В большинстве случаев новые режимы работы реализуются путем изменения ПО БРЛС.

Основные направления развития аппаратуры БРЛС — это совершенствование:

1) антенной системы (увеличение мощности, канальности и полосы),
2) приемо-передающей системы (повышение надежности, расширение полосы, динамического диапазона, стабильности генератора),

3) вычислительной системы (увеличение быстродействия, объема памяти, скоростей обмена),
4) микронавигационной системы (повышение точности, времени автономной работы),
5) средств разработки и испытания аппаратного и программного обеспечения (развитие средств регистрации, обработки результатов стендовых и натурных работ, стендов имитационного и полунатурного моделирования).

Элементная база является одним из основных факторов, сдерживающих развитие аппаратуры БРЛС.

Направления развития программно-алгоритмического обеспечения можно также разделить на несколько групп:

1. Распознавание не только воздушных, но и наземных целей.
2. Сопровождение с редким тактом обращения маневрирующих наземных и воздушных целей, в том числе гиперзвуковых и малозаметных, а также атакующих ракет.
3. Формирование радиолокационного изображения и разработка адаптивных эффективных алгоритмов обработки сигналов с высоким разрешением в условиях недостаточной точности навигационных систем и априорной неопределенности о рельефе.
4. Обеспечение режима маловысотного полета в большой зоне обзора.
5. Многопозиционная работа при высокоточной пространственно-временной синхронизации и организации обмена сигнальной и параметрической информацией между позициями.
6. Помехозащищенность и скрытность.
7. Измерение координат целей и источников помех при маневре и длительном накоплении, в том числе и в пассивных режимах.
8. Сетецентрического взаимодействия носителей и оружия.

Решение проблем программно-алгоритмического обеспечения связано в первую очередь с повышением уровня инженерных и научных кадров, а также требует тесного взаимодействия научных, производственных, испытательных и учебных организаций на всех этапах разработки и эксплуатации авиационной техники.

***Литература***

1. Лепин В. Н., Антипов В. Н. и др. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием. Монография / Под ред. В. Н. Лепина. — М.: Радиотехника, 2017. — 416 с.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.124.125

# Применение технологий радиофотоники при создании локаторов космического базирования с синтезированной апертурой

## Application of Radio Photonics Technologies while Creating Space-based Synthetic-aperture Radars

**Лось В. О.**
*АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2*
*lvo_13@mail.ru*

**Los V. O.**
*Submicron Scientific Research Institute JSC*
*bld. 2, 5 Georgievsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460*
*lvo_13@mail.ru*

Предложены технические решения по созданию локатора космического базирования на основе технологий радиофотоники. Проведен анализ технических решений с учетом требований к радарам с синтезированной апертурой.
**Ключевые слова:** локатор; радиофотоника; антенная система; диаграмма направленности; усилитель; мощность; шумовая температура; генератор несущей частоты.

The paper presents technical solutions for the creation of a space-based radar based on radio photonics technologies. The analysis of technical solutions has been carried out taking into account the requirements for synthetic-aperture radars.
**Keywords:** locator; radio photonics; antenna system; directional diagram; amplifier; power; noise temperature; carrier frequency generator.

Пиковая мощность излучения антенной системы (на базе АФАР) локатора космического базирования составляет несколько киловатт [1], и с учетом проблемы отвода тепла и обеспечения энергопотребления важной задачей является повышение КПД в режиме передачи и добротности в режиме приема (шумовой температуры). Наиболее реализуемой (в настоящее время) с практической точки зрения представляется функциональная схема приемо-передающего модуля, в которой пиковая выходная мощность (может составлять для большинства низкоорбитальных систем от 10 до 20 Вт) обеспечивается применением ИМС на базе GaAs- или GaN-технологии с коэффициентом усиления 25–30 дБ, а входной сигнал снимается с фотоприемника с выходной мощностью несколько десятков мВт. Такой выбор обусловлен прежде всего существующей на сегодняшний день компонентной базой [2]. Предполагается, что усилитель и фотоприемник установлены в общей гибридной сборке и согласованы пассивной цепью согласования, чем обеспечивается наиболее компактная конструкция. Предлагается в оптоволокно добавить сигнал синхронизации модулятора питания (на другой длине волны), при этом на оптическом входе появляется мультиплексор, но при условии общей гибридной сборки данное решение может обеспечить выигрыш в массе и габаритах.

Коэффициент шума электронных усилителей в настоящее время остается ниже радиофотонных преобразователей, при этом снижение шумовой температуры приемной системы является предпочтительным. Предлагается, подобно каналу

передачи, после малошумящего усилителя ввести в состав схемы модуля преобразователь в оптический диапазон, в соответствии с этим состав приемо-передающего модуля в целом будет выглядеть следующим образом:

- оптический мультиплексор, разделяющий сигналы приема, передачи, а также сигналы синхронизации приема и передачи;
- усилитель мощности с модулятором питания;
- оптический преобразователь в радиочастотный сигнал;
- малошумящий усилитель с модулятором питания;
- преобразователь радиосигнала в оптический сигнал;
- циркулятор.

Длина антенной системы вдоль линии движения космического аппарата достаточно велика (в некоторых проектах около 10 метров), и фазовращатели не обеспечат формирование диаграммы направленности в полосе частот. Элементы электронного сканирования лучом антенной системы предполагается вынести в отдельные модули, т.к., с одной стороны, количество лучей невелико, а формирование диаграмм направленности необходимо обеспечивать с помощью линий задержки. Схема формирования диаграммы направленности на переключаемых линиях задержки может быть сравнительно простой, при этом выполненной на основе технологий радиофотоники, но должна быть многоканальной, особенно в режимах обзорной съемки т.к. одновременный прием отраженного сигнала от различных участков земной поверхности дает значительные преимущества для широкополосной обзорной съемки. В связи с необходимостью многоканального приема возникает техническая целесообразность создания гибридной функциональной схемы цифрового формирования диаграммы направленности и переключаемых линий задержки, соотношение цифровой и аналоговой обработки определяется необходимым количеством каналов приема и экономическими соображениями.

Формирователи несущих частот на основе радиофотоники обеспечивают более низкие уровни фазовых шумов [3, 4], что актуально для задач радиолокации, особенно в части селекции движущихся объектов. Технические решения по созданию таких генераторов позволяют внедрять их в текущие разработки.

Перспективным и важным направлением для задач космической радиолокации является создание высокоскоростных АЦП [5], однако технологическая реализация требует дополнительных исследований.

***Литература***

1. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Криштопов А. В. Кудря А. И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 482 с.
2. Митяшев М. Б. К реализации технологий радиофотоники в АФАР радиолокационных комплексов // Вестник СибГУТИ, 2015. — № 2. — С. 178–190.
3. Шумов А. В., Нефедов С. И., Бикметов А. Р. Концепция построения радиолокационной станции на основе элементов радиофотоники // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн., 2016. — № 05. — С. 41–65.
4. Быстров Р. П., Соколов С. А., Черепенин В. А. Системы и устройства на основе радиофотоники применительно к радиолокации // Журнал радиоэлектроники, 2017. — № 6. — С. 1–17.
5. Стариков Р. С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники, 2015. — № 2. — С. 3–39.

УДК 621.37.037 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.126.128

# Построение группировки малых космических аппаратов радиолокационного зондирования Земли и синтез требований к бортовой радиолокационной аппаратуре

## Remote Sensing Radar's Small Spacecraft Constellation and Requirements to Onboard Radar Equipment

**Цветков В. К.[1], к. т. н., Лялин К. С.[1], к. ф.-м. н., Переверзев А. Л.[1], д. т. н., Орешкин В. И.[1], к. т. н., Козлов В. А.[1], к. т. н.**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*ksl@miee.ru*

**Tsvetkov V. K.[1], Ph.D, Lyalin K. S.[1], Ph.D, Pereverzev A. L.[1], Ph.D, Oreshkin V. I.[1], Ph.D, Kozlov V. A.[1], Ph.D**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*ksl@miee.ru*

В настоящее время наблюдается активное развитие радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли космического базирования. При этом наблюдается тенденция применения малых космических аппаратов в качестве носителей. Радиолокационные средства ДЗЗ КА нашли широкое применение не только в интересах обороны, но и в коммерческом секторе. В РФ ведется активная работа над созданием отечественной системы ДЗЗ малых КА, но сколь угодно значимых результатов в этом направлении пока не достигнуто. В рамках доклада предложен вариант построения группировки малых космических аппаратов радиолокационного зондирования Земли, облик систем, а также приведены результаты расчетов требований к бортовой аппаратуре — радиолокатору с синтезированной апертурой. Предложены основные подходы в рамках экспериментальной отработки.
**Ключевые слова:** ДЗЗ; радиолокатор с синтезированной апертурой; малый космический аппарат; МКА.

There is an active remote sensing space-based radars development now. At the same time, there is a tendency to use small spacecraft as carriers. Small spacecraft remote sensing radars are widely used not only in the interest of defense, but also in commerce. In the Russian Federation small spacecraft remote sensing radars development is in progress, but no significant results in this direction have been achieved yet. The paper presents a variant of the remote sensing radars small spacecraft constellation, radar system architecture (synthetic aperture radar) and the radar's main characteristics calculation results. The main approaches to experimental development have been proposed.
**Keywords:** remote sensing; synthetic aperture radar; small spacecraft; SAR; SAR constellations

Отечественная космическая промышленность имеет богатую историю создания, запуска и эксплуатации радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли на базе радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА).

Так, например, аппаратура спутника «Алмаз-1» 1991–1992 гг. эксплуатации работала в S-диапазоне частот, имела полосу захвата порядка 280 км и разрешение получаемых изображений 8–15 м, а сам аппарат имел массу порядка 3420 кг [1]. Значимых успехов в данном направлении добились многие зарубежные разработчики. До настоящего времени проводятся запуски спутников массой от 1 т. Созданию же группировки таких спутников в РФ препятствует высокая стоимость аппаратуры и ее разработки (модернизации), сложности ее вывода на орбиту. Таким образом, возникает экономическая обоснованность решения технической задачи установки РСА на борт малого космического аппарата. Это, безусловно, приведет к упрощению непосредственно самого РСА, а следовательно, необходимо также разработать РСА с учетом ужесточения требований к массе и габаритам. При этом важно понимать, что задача создания такой системы ДЗЗ — это не только проектирование радара под конкретный носитель, но и расчет требований ко всей группировке [2].

Размещение радиолокационного оборудования на борту малого космического аппарата открывает перспективы развития средств дистанционного зондирования Земли. Задача установки РСА на МКА решена за рубежом. Так, например, компания ICEYE (Финляндия) запускает спутники массой до 100 кг на орбиту 570 км с установленной аппаратурой РСА на базе активных фазированных антенных решеток. При этом обеспечивается разрешение получаемых изображений до 1 м. Оперативность получаемых изображений — не более 24 часов. Компания Capella Space (США) также осуществила запуск аппаратуры РСА на спутнике Sequoia с общей массой 107 кг на орбиту 525 км. Разрешение получаемых изображений — до 0,5 м.

В РФ ведется активная работа над обликом аналогичной системы, в том числе предварительная проработка комплекса, задействованы крупнейшие предприятия космической отрасли, но сколь угодно значимых результатов в этом направлении достичь пока не удалось.

Сотрудниками НИУ «МИЭТ» также ведется проработка технических решений, по результатам которой сложился облик технической системы для установки на борт малого КА для работы на высотах от 400 км. Предложена структура РСА на базе модульной АФАР с полосой захвата не менее 200 км, разрешением порядка 0,5 м. Даны предложения по структуре наземного оборудования, созданию системы калибровки. Проведен расчет спутниковой группировки, в соответствии с которым обеспечивается «закрытие» всех участков поверхности Земли с оперативностью до 12 часов, а территории РФ — не более 6 часов.

***Литература***

1. Sung Wook Paek. Synthetic Aperture Radar // Remote Sens. 2020, 12, 2546.
2. Safy M. Synthetic Aperture Radar for Small Satellite // Int. J. Innov. Technol. Eng. 2019, 9, 3435–3440.

The domestic space industry has a rich history of creating, launching and operating radar facilities for remote sensing of the Earth based on synthetic aperture radars (SAR). So, for example, the Almaz-1 satellite (1991–1992 operation years) operated in S-frequency range, had a swath of 280 km and a resolution of the resulting images of 8–15 m, mass of about 3420 kg [1]. Many foreign developers have achieved significant success in this direction, many satellites with a mass of 1 ton or more are being launched. The creation

of a constellation of such satellites in the Russian Federation is hampered by the high cost of equipment and its development (modernization), the complexity of its launch. Thus, there is a tech problem of installing SAR on small spacecraft and economic necessity of this problem solving. This solving, certainly, leads to the simplification of the SAR itself, and, therefore, it is also necessary to develop the SAR, taking into account the tightening of the requirements for mass and dimensions. It is important to understand that the task of creating such a remote sensing system is not only designing a radar for a specific carrier, but also calculating the requirements for the entire constellation [2].

The radar equipment on-board installation opens prospects for the development of remote sensing systems. The small spacecraft SAR installation task was solved in Finland. ICEYE satellites weight is less than 100 kg, orbit — 570 km. Radar image resolution is 1 m. Image receiving waiting time — less than 24 hours. Capella Space (USA) also launched SAR on Sequoia satellite (weight — 107 kg, orbit — 525 km). Radar image resolution: 0,5 m.

The similar system's architecture is in progress in the Russian Federation, a preliminary study of the complex is underway, with the largest space industry enterprises being involved. But no significant results in this direction have been achieved yet.

National Research University of Electronic Technology employees have also finished the small satellite SAR architecture development task. The results of the researches: SAR architecture based on modular APAA, orbit — 400 km, swath — above 200 km, SAR image resolution: better than 0,5 m. Ground equipment and calibration system structures proposals have been given. The calculation of the satellite constellation was carried out, in accordance with which the "closure" of all areas of the Earth's surface is ensured with an image waiting time of up to 12 hours, and that of the territory of the Russian Federation — less than 6 hours.

***References***

1. Sung Wook Paek. Synthetic Aperture Radar. Remote Sens. 2020, 12, 2546;.
2. Safy M. Synthetic Aperture Radar for Small Satellite. Int. J. Innov. Technol. Eng. 2019, 9, 3435–3440.

УДК 621.03.01 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.129.131

# Разработка MIMO-радара на базе ФКМ-сигналов

## Developing MIMO Radar Based on PSK Signals

**Переверзев А. Л., Лялин К. С., Мелёшин Ю. М., Карпов В. Н., Колесников Р. Н.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Pereverzev A. L., Lyalin K. S., Meleshin Y. M., Karpov V. N., Kolesnikov R. N.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Представлены результаты разработки MIMO-радара на базе ФКМ-сигналов Ku-диапазона частот, предназначенного для обнаружения БПЛА и других летающих объектов и обладающего высокой разрешающей способностью по скорости и по пространственным координатам. Приведен расчет требуемых характеристик радара и описан процесс разработки его конструкции.
**Ключевые слова:** MIMO-радар; ФКМ; виртуальная антенная решетка.

The paper presents the results of the development of a MIMO radar based on the PFM signals of the Ku-band with a high resolution in speed and spatial coordinates. It is designed to detect UAVs and other flying objects. Besides it offers the radar required characteristics calculations and the constructional design development process.
**Keywords:** MIMO radar; PSK; virtual antenna array.

В последнее время все больше исследований и разработок направлено в сторону изучения MIMO (multiple input — multiple output — «много входов — много выходов») радаров [1–3], ключевой особенностью которых является использование цифровых антенных решеток как на прием, так и на передачу, что позволяет передавать с каждого излучателя различные сигналы. В традиционной системе с фазированной антенной решеткой для улучшения пространственного разрешения необходимо увеличение количества антенных элементов, что существенно усложняет и удорожает систему, в то время как радиолокационные системы MIMO предполагают использование различных взаимно ортогональных сигналов в каждом из передающих каналов, что приводит к получению в приемниках отраженных сигналов от цели для различных сигналов, что эквивалентно увеличению числа элементов в антенной решетке и позволяет повысить угловое разрешение радара [4].

В данной статье представлены результаты исследования, посвященного разработке MIMO-радара на базе ФКМ-сигналов Ku-диапазона частот. В процессе исследования были рассчитаны требуемые характеристики устройства, разработаны его составные части и подобрано оптимальное расположение всех модулей. Использование интегрированных в печатные узлы приемника и передатчика антенных элементов позволило избавиться от лишних потерь в соединителях и улучшить дальность работы комплекса. Также стоит сказать, что уникальной особенностью такой системы является использование всего цикла работы для каждой цели, что позволяет существенно улучшить разрешающую способность по скорости.

В результате был разработан MIMO-радар, имеющий следующие характеристики:

- максимальная дальность действия — не менее 500 м;
- ЭПР цели — не менее 0,01 кв. м;
- предельная разрешающая способность по скорости — 0,1 м/с;
- угловое разрешение по азимуту и углу места — 1,5 на 3 градуса;
- сектор работы по азимуту и углу места — ±60 градусов;
- размеры всего устройства — 30×40×20 см.

***Литература***


1. Chernyak V. S. On a new direction in radar: MIMO radar // Applied Radioelectronics, 2009. V. 8. № 4. P. 477–489.
2. Yuan L. H., Zheng G. and Li X. W. Research on theory and technology of distributed MIMO radar systems // Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, 2011. P. 87–90. DOI: 10.1109/CIE-Radar.2011.6159482.
3. Davis M., Showman G., Lanterman A. Coherent MIMO radar: The phased array and orthogonal waveforms // Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE. 2014. Vol. 29. № 8. P. 76–91.
4. Robey F. C., Coutts S., Weikle D., McHarg J. C. and Cuomo K. MIMO radar theory and experimental results // Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004. Vol. 1. P. 300–304. DOI: 10.1109/ACSSC.2004.1399141.
5. Meleshin Y. M., Romanova E. O., Lyalin K. S., Khasanov M. S. and Dovgal T. A. BPSK-based MIMO Radar Energy Efficiency Analysis // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021. P. 2538–2540. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396500.
6. Daum F. and Huang J. MIMO radar: Snake oil or good idea? // 2009 International Waveform Diversity and Design Conference, 2009. P. 113–117. DOI: 10.1109/WDDC.2009.4800326.
7. Meleshin Y. M., Romanova E. O., Zatonskaya A. A., Kuzmin I. A. and Airapetian A. A. Optimization of the Arrangement of Antenna Elements of the Ku-band MIMO Radar // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021. P. 2541–2543. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396418.


Recently, more and more research and development has been focused on the study of MIMO radars (multiple inputs — multiple outputs) [1–3]. A key MIMO radars feature is the use of smart antenna arrays for both reception and transmission, which makes it possible to transmit various signals from each radiator element. In a traditional phased array system, additional antennas are needed to improve spatial resolution, while MIMO radar systems use different mutually orthogonal signals in each of the transmit and/or receive channels, resulting in echoes in the receivers from targets for different signals, which is equivalent to an increase in the number of elements in the antenna array and allows you to increase the angular resolution of the radar [4].

The article presents the results of a study devoted to the development of a Ku-band MIMO radar based on PSK signals. In the course of the study, the required characteristics

of the device were calculated, its components were developed and the optimal arrangement of all modules was selected. The use of antenna elements integrated into the printed circuit boards of the receiver and the transmitter made it possible to get rid of unnecessary losses in the connectors and improve the range of the complex. Also, it should be noted that a unique feature of such a system is the use of the entire cycle of work for each target, which can significantly improve the speed resolution.

As a result, a MIMO radar has been developed with the following characteristics:

- maximum operating range: not less than 500 m;
- RCS: not less than 0,01 sq m;
- limiting speed resolution: 0,1 m/s;
- angular resolution in azimuth and elevation: 1.5 by 3 degrees;
- sector of work in azimuth and elevation: ±60 degrees;
- device dimensions: 30×40×20 cm.

***References***


1. Chernyak V. S. On a new direction in radar: MIMO radar // Applied Radioelectronics, 2009. V. 8. № 4. P. 477–489.
2. Yuan L. H., Zheng G. and Li X. W. Research on theory and technology of distributed MIMO radar systems. Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, 2011. P. 87–90. DOI: 10.1109/CIE-Radar.2011.6159482.
3. Davis M., Showman G., Lanterman A. Coherent MIMO radar: The phased array and orthogonal waveforms // Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE. 2014. Vol. 29. № 8. P. 76–91.
4. Robey F. C., Coutts S., Weikle D., McHarg J. C. and Cuomo K. MIMO radar theory and experimental results. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004. Vol. 1. P. 300–304. DOI: 10.1109/ACSSC.2004.1399141.
5. Meleshin Y. M., Romanova E. O., Lyalin K. S., Khasanov M. S. and Dovgal T. A. BPSK-based MIMO Radar Energy Efficiency Analysis. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021. P. 2538–2540. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396500.
6. Daum F. and Huang J. MIMO radar: Snake oil or good idea? 2009 International Waveform Diversity and Design Conference, 2009. P. 113–117. DOI: 10.1109/WDDC.2009.4800326.
7. Meleshin Y. M., Romanova E. O., Zatonskaya A. A., Kuzmin I. A. and Airapetian A. A. Optimization of the Arrangement of Antenna Elements of the Ku-band MIMO Radar. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021. P. 2541–2543. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396418.

УДК 621.37 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.132.133

# Модельно-ориентированное проектирование радиотехнических систем

## Model-oriented Design of Radio-engineering Systems

**Усс М. О.**
*ООО Центр Инженерных Технологий и Моделирования «Экспонента»*
*115114, г. Москва, Дербеневская наб., 7, стр. 9*
*marat.uss@exponenta.ru*

**Uss M. O.**

Описан процесс разработки радиотехнических систем с применением модельно-ориентированного подхода. Описаны этапы рабочего процесса: требования к системе или устройству, разработка и тестирование на модели, генерация кода для цифровых вычислителей, верификация. Приведены примеры завершенных проектов на базе модельно-ориентированного проектирования.

**Ключевые слова:** моделирование; беспроводная связь; радиотехника; САПР; автоматическая генерация кода; модельно-ориентированное проектирование.

На сегодняшний день создание сложных радиотехнических систем, таких как многофункциональные радары, приемники и передатчики 5G или системы обработки изображений и видео, невозможно без применения современных средств и методик проектирования.

Инженеры сталкиваются с техническими и управленческими проблемами практически на всех этапах разработки:

- проверка общих требований к системе на реализуемость;
- уточнение низкоуровневых требований к отдельным узлам;
- тестирование и интеграция отдельных узлов;
- перенос алгоритмов на цифровые вычислители и верификация кода.

Концепция модельно-ориентированного проектирования (МОП) позволяет решить большую часть описанных проблем, так как в основу процесса разработки ставится системная модель, фиксирующая высокоуровневые и низкоуровневые требования к системе и ее узлам и позволяющая отработать поведение различных вариантов системы в различных симулируемых сценариях еще до этапа натурных испытаний. Помимо этого, в рамках концепции МОП формирование исполняемого алгоритмического кода для цифровых вычислителей (в том числе отечественных) происходит автоматически — прямо из системной модели.

Впрочем, применение описываемой концепции в российских реалиях сильно затрудняется без современных средств моделирования и пересмотра устоявшегося подхода к разработке.

В докладе на примерах успешных проектов, выполненных с участием инженеров «ЦИТМ «Экспонента», демонстрируется, как описываемый рабочий процесс позволяет отечественным компаниям ускорить и автоматизировать многие этапы разработки, оптимизировать командную работу, снизить зависимость от натурных испытаний и риски при создании сложных радиотехнических систем.

***Литература***

1. Phased Array Radar Modeling in MATLAB and Simulink by Honglei Chen Rick Gentile, 30.11.2020, Artech House E. Brookner, Aspects of Modern Radar, 1988.
2. Chen H., Gentile R. Phased Array Radar System Simulation // 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology.
3. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем / Специальный справочник. — СПб.: «Питер», 2002.

УДК 519.8 + 658.51 + 621.45.018 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.134.136

# Алгоритм высокоточной оценки текущих параметров надежности РЛК при работе в теплонапряженных режимах

## Algorithm for High-precision Assessment of the Current Parameters of Reliability in the Radar During Operation in Heat-stressed Modes

**Тимошенко А. В.[1], д. т. н., Калеев Д. В.[1], к. т. н., Перлов А. Ю.[1], к. т. н., Ермаков А. В.[2]**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*laperlov@yandex.ru*
*[2] АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца»*
*127083, г. Москва, ул. 8 Марта, 10, стр. 1*

**Timoshenko A. V.[1], Sc.D, Kaleev D. V.[1], Ph.D, Perlov A. Yu.[1], Ph.D, Ermakov A. V.[2]**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*laperlov@yandex.ru*
*[2] "Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute" JSC*
*3 Eighth March St., Moscow, 127083*

Предложен оригинальный подход к решению задачи высокоточной оценки текущих параметров надежности в теплонапряженных РЛК. Показана возможность повышения точности оценки параметров надежности с использованием алгоритма, основанного на агрегировании статической модели надежности и тепловой модели передающих комплексов РЛК.
**Ключевые слова:** РЛК; отказы; тепловая модель; агрегирование; модель надежности.

The paper offers an original approach to solving the problem of high-precision estimation of current reliability parameters in heat-stressed RLC. The possibility of increasing the accuracy of estimating reliability parameters using an algorithm based on the aggregation of a static reliability model and a thermal model of RLC transmission complexes has been shown.
**Keywords:** radar; failures; thermal model; aggregation; reliability model.

Повышение требований к дальности действия современных РЛК обуславливает необходимость увеличения мощности излучаемых сигналов, что приводит к росту тепловыделения аппаратуры усиления мощности [1]. Кроме того, различные режимы функционирования РЛК характеризуются различной динамикой тепловыделения, которые наиболее существенны при переходе на квазинепрерывные зондирующие сигналы. При этом обеспечение параметров надежности РЛК всегда имеет критически важное значение, так как существенно влияет на вероятность выполнения поставленной задачи по обнаружению целей с заданными тактико-техническими характеристиками (ТТХ).

Существующий алгоритм оценки параметров надежности РЛК основан на расчете точечной оценки средней наработки на отказ всех типов аппаратуры, а также

времени восстановления с использованием статической модели надежности [2]. Под статическими моделями понимаются те, в которых состояния РЛК определяются наборами работоспособных и неработоспособных состояний элементов РЛК в заданный момент времени, т. е. имеющие бинарный тип данных технического состояния. При этом данный алгоритм имеет следующие недостатки:

1. Не учитывается смена режимов работы РЛК, в том числе влияние тепловых процессов функционирования блоков усиления мощности (БУМ).
2. Не учитываются параметры зондирующих сигналов (скважность, длительность), подаваемых на вход БУМ.
3. Не фиксируется учет взаимного влияния по температуре БУМ, установленных в стойках передающих комплексов РЛК.

Указанные недостатки обуславливают необходимость совершенствования существующего алгоритма оценки таких параметров надежности РЛК, как вероятность безотказной работы, коэффициент оперативной готовности. Ключевыми особенностями алгоритма являются использование модели тепловых процессов передающих комплексов РЛК и агрегирование ее данных со статической моделью надежности. Под агрегированием понимается процесс обобщения данных статической и тепловой моделей надежности для повышения точности оценки текущих параметров надежности РЛК с учетом тепловых процессов функционирования.

Таким образом, повышение точности оценки параметров надежности возможно за счет использования алгоритма агрегирования моделей надежности на основе большого объема данных о техническом состоянии РЛК, регистрируемого контрольно-диагностической системой РЛК.

***Работа выполнена при поддержке гранта Президента (№ МК-241.2021.4).***

***Литература***

1. Ступин Д. Д., Перлов А. Ю., Маврин А. В. Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС // Известия ЮФУ. Технические науки, 2018. — Вып. № 3. — С. 143–155.
2. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование. Коллективная монография / Под. ред. С. Ф. Боева. — М.: Радиотехника, 2013. — 168 с.

Higher requirements for the range of modern radar necessitate increasing the power of the probing signals, which leads to an increase in heat generation of power amplification units [1, 2]. At the same time, ensuring the reliability parameters of the radar is always crucially important, since it significantly affects the likelihood of completing the assigned task of detecting targets with given tactical and technical characteristics. The various modes of operation of the radar are characterized by excellent rates of power release, which are most noticeable when using quasi-continuous signals.

These shortcomings determine the relevance of improving the existing algorithm for assessing the reliability indicators of radar systems, taking into account the aggregation of the model of thermal processes, but also the static model of reliability. Aggregation is understood as the process of generalization of static and dynamic reliability models to improve the accuracy of assessing the current reliability parameters of the radar control system, taking into account switching to heat-stressed modes of operation.

Thus, an increase in the accuracy of estimating reliability parameters is possible through the use of an aggregation algorithm for reliability models, based on a large amount of data on the technical condition of the radar, recorded by the radar control and diagnostic system.

***This work was supported by the president's grant (№ MK-241.2021.4).***

***References***

1. Moshchnyye nadgorizontnyye RLS dalnego obnaruzheniya: razrabotka, ispytaniya, funktsionirovaniye. Kollektivnaya monografiya / Pod. red. S. F. Boyeva. M.: Radiotekhnika, 2013. 168 p. (In Russian).
2. Stupin D. D., Perlov A. Yu., Mavrin A. V. Issledovaniye i ispytaniya peredayushih kompleksov AFAR dlya obespecheniya taktiko-tekhnicheskikh kharakteristik RLS // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki. Vypusk № 3. 2018. P. 143–155. (In Russian).

УДК 621.396.621.54 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.137.141

# Разработка малогабаритного двухполяризационного доплеровского метеорологического радиолокатора ближней зоны

## Developing a Small-sized Bipolarized Doppler Meteorological Near-field Radar

**Цыпленков Ю. С.[1], Анурин А. А.[2]**
*[1] ООО «СИНТЕЗАТОР-НН»*
*603057, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, 2, лит. У, оф. 315*
*synthesprom@yandex.ru.*
*[2] АО «ФНПЦ» ННИИРТ»*
*603950, г. Нижний Новгород, ул. Шапошникова, 5*
*anurin123@yandex.ru.*

**Tsyplenkov Y. S.[1], Anurin A. A.[2]**
*[1] SYNTHESIZER-NN LLC*
*of. 315, lit. U, 2 Nartova St., Nizhny Novgorod, 603057*
*synthesprom@yandex.ru.*
*[2] "FSPC" NNIIRT" JSC*
*5 Shaposhnikova St., Nizhny Novgorod, 603950*
*anurin123@yandex.ru.*

В целях повышения эффективности метеорологических наблюдений за счет своевременного оповещения и сверхкраткосрочного прогнозирования опасных явлений погоды, снижая риск аварийных ситуаций при взлете, посадке и движении воздушных судов в условиях мощной кучево-дождевой и грозоградовой облачностей, горизонтальном и вертикальном сдвигах ветра, предлагаем разработку малогабаритного двухполяризационного доплеровского метеорадиолокатора с дальнейшим построением единой радиолокационной сети на территории Российской Федерации.
**Ключевые слова:** метеорологический радиолокатор; доплеровский метеорадиолокатор; метеорологическое обеспечение аэронавигации; опасные явления погоды; удаленный управляющий вычислительный комплекс; система раннего обнаружения и своевременного прогнозирования.

The paper presents a small-sized bipolarized Doppler meteorological radar with the further construction of a unified radar network on the territory of the Russian Federation. This will make it possible to increase the efficiency of meteorological observations due to timely warning and ultra-short-term forecasting of dangerous weather phenomena, reducing the risk of accidents during takeoff, landing and movement of aircraft in conditions of powerful cumulonimbus and thunderstorm clouds, horizontal and vertical wind shears.
**Keywords:** weather radar; Doppler weather radar; meteorological support for air navigation; dangerous weather phenomena; remote control computer complex; early detection and early forecasting system.

На сегодняшний день в России метеорологические наблюдения претерпевают серьезные методологические изменения, требующие новых подходов и средств радиолокационного мониторинга для построения единой информационной сети, способной повысить точность прогнозов, обеспечивая высокое качество распознавания и идентификации облачности и осадков, неблагоприятных и опасных явлений погоды.

Одним из перспективных направлений развития метеорологических наблюдений в условиях кучево-дождевой облачности и грозоопасности, характерной для районов Кавказа, Краснодарского края и Ставрополья, является разработка мобильных автономных малогабаритных доплеровских радиолокаторов ближнего действия с возможностью их использования в полевых условиях (в различных климатических зонах), а также в горах, ущельях и на пересеченной местности.

Основной выходной информацией радиолокационных метеорологических наблюдений является информация о местоположении, внутренней структуре, метеорологических характеристиках (тип метеоявления, интенсивность и фаза выпадающих осадков, верхняя граница облачности, доплеровская скорость) полей облачности и осадков, а также наблюдения их перемещений и эволюции, дающие возможность сверхраткосрочного (до 1–3 часов) прогноза погоды.

Согласно данным ИКАО (International Civil Aviation Organization, ICAO — Международная организация гражданской авиации), 28 % авиационных происшествий связаны с неблагоприятными и опасными метеоусловиями, 48 % авиационных происшествий происходят на этапе захода на посадку и приземления воздушного судна, причиной которых является приземной ветер.

Градобития наносят огромный ущерб народному хозяйству, уничтожая посевы, повреждая дома, нередки случаи гибели скота, домашней птицы. Потери урожая сельскохозяйственных культур от градобитий в среднем составляют от 4 до 18 %, что превышает 11 млрд долл. США в год.

Поэтому проблема раннего обнаружения и своевременного прогнозирования опасных для авиации и наземной инфраструктуры явлений погоды, таких как гроза, град, ливни, шквалистый ветер, турбулентность и др., а также недостаточной безопасности полетов воздушных судов и человека является крайне актуальной.

Анализ рынка показал серьезные успехи наших западных и американских конкурентов [1]. На международном рынке метеорологические радиолокаторы представлены такими компании, как NEXRAD — WSR-88D (США), Vaisala — WRM200 (Финляндия), Gematronik — Meteor500C (Германия), EEC — DWSR 2501C (США).

В Российской Федерации, странах СНГ и ряде стран Европы, Азии, Африки, Южной Америки и Кубе для штормооповещения аэропортов и предупреждения изменяющихся погодных условий используются метеорологические радиолокаторы МРЛ-5и МРЛ-С, созданные на базе метеолокатора МРЛ-5. Радиолокатор МРЛ-5 считался одним из лучших в мире, но в настоящее время его промышленное производство прекращено.

На действующей метеорологической сети работает радиолокатор 5-сантиметрового диапазона ДМРЛ-С, разработанный в 2010 году концерном «ВКО «Алмаз-Антей» (АО «Лианозовский электромеханический завод», КБ «Лира», г. Нижний Новгород) в рамках двух федеральных целевых программ (ФЦП). Несмотря на грамотный подход к созданию систем формирования и цифровой обработки сигнала

за счет применения сигналов с изменяющимися параметрами модуляции, метеолокатор ДМРЛ-С имеет ряд существенных недостатков:

- невозможность работы в разных климатических поясах (из-за значительного затухания волны в грозоградовой облачности затруднен прием сигнала в тропиках и субтропиках);
- значительные массогабаритные характеристики (вес вместе эстакадой 25 тонн);
- большое энергопотребление (10 кВт);
- высокая цена (порядка 110 млн руб.).

На сегодня метеорадиолокатор — это единственная система, которая локально детализированно в трехмерном зондировании обеспечивает метеорологический мониторинг. К сожалению, в России лишь 20 % территории покрыто сетью метеолокаторов, а районы Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера не охвачены.

Для решения проблемы предлагаем создать сеть малогабаритных доплеровских двухполяризационных метеорадиолокаторов ближней зоны с радиусом действия 150 км, которая призвана дополнить и расширить существующую сеть в целях создания единого неразрывного радиолокационного поля над территорией Российской Федерации с перспективой выхода в другие страны и континенты.

Элементом сети будет являться метеорологический доплеровский радиолокатор 3-см диапазона МРЛ-Х-01 собственной разработки (рис. 1), предназначенный для мониторинга и оценки параметров движения различного класса метеорологических целей, что позволяет обнаруживать облачность и осадки, направление и скорость смещения мощно-кучевой, кучево-дождевой и слоистой облачности, отслеживать динамику поведения гроз, характер кучево-дождевых и грозоградовых метеообразований, предупреждать о надвигающейся опасности приземного ветра, вертикальных и горизонтальных вихревых потоков, об образовании опасных явлений погоды и приближении их к районам на расстояния, заданные оператором.

**Новизна разработки** состоит в наличии интеллектуальной самотестируемой фазированной антенной решетки отражательного типа с дистанционно управляемой диаграммой направленности, высокоскоростном электронном сканировании луча в азимутальной и угломестной плоскостях, автоматизированном поиске фокуса, оптимизации диаграммы направленности по заданному алгоритму и поиске неисправностей в режиме реального времени.

Метеорологический радиолокатор МРЛ-Х-01 состоит из антенного устройства, высокочастотного блока с приемо-передающей аппаратурой, модулем цифровой обработки эхо-сигнала и системным контроллером, антенно-поворотного устройства, радиопрозрачного обтекателя (РПО) в виде параболоида вращения. Аппаратура метеорологического радиолокатора предназначена для работы в условиях пониженных и повышенных температур, пониженного и повышенного атмосферного давления, пониженной и повышенной влажности, тумана, морской соли, пыли, песка.

Метеорологический радиолокатор МРЛ-Х-01 оснащен модулем связи для дистанционного управления с удаленных терминалов и использует защищенные протоколы высокоскоростной передачи данных (до 10 Мбит/с).

**Рис. 1.** Метеорадиолокатор МРЛ-Х-01

Для получения сигналов точного времени, топографической привязки и навигационного обеспечения используется радионавигационный модуль, устанавливаемый в отдельный ВЧ-блок рядом с основной аппаратурой метеорологического радиолокатора.

В метеорадиолокаторе МРЛ-Х-01 предусмотрены автоматизированная система контроля неисправностей и удаленное оповещение о состоянии составных частей радиолокатора (на уровне модулей и узлов) с передачей и отображением контрольной информации на удаленные терминалы пунктов управления.

Радиолокатор питается от сети 220 В / 50 Гц, в качестве альтернативного источника энергии используется блок гибких солнечных батарей. Корпус радиопрозрачного обтекателя имеет твердотельную структуру с полиуретановым покрытием и является радиопрозрачным для электромагнитных волн, на которых работает радиолокатор.

В целях выявления потенциальной потребности в малогабаритных доплеровских метеорадиолокаторах ближней зоны проведены проблемные и решенческие интервью с представителями научных организаций и региональных управлений Росгидромета, с филиалами ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», получены положительные отзывы и письма поддержки.

Стратегия выхода на российский рынок основана на плотной коммуникации с научными организациями, региональными представительствами и головным офисом заказчика, выявлении проблем и их систематизации по степени значимости, совместной подготовке технического задания и эксплуатационных документов, доведении информации до всех абонентских пунктов и центров принятия решения, использовании единых протоколов и международных стандартов для получения идеального облика будущего продукта в глазах потребителя.

Согласно данным IndustryARC, мировой рынок продукта в 2020 году составил 8 млрд долларов. В период с 2020 по 2030 годы рынок будет расти с ежегодным приростом в 4,6 % и к 2030 году достигнет 13 млрд долларов [5]. Сейчас на мировом рынке 18 производителей метеорадиолокаторов. Из основных игроков компания

Honeywell сохранила свое первое место в рейтинге 2017 года с долей 24%. На других игроков приходилось 13,3% — Enterprise Electronics Corporation (США) и 5,2% — Selex Systems Integration (Германия).

Проведен сравнительный анализ с метеорадиолокаторами российского и зарубежного производства, выявлены конкурентные преимущества предлагаемого технического решения. МРЛ-Х-01 может работать в разных климатических поясах (включая Арктическое применение) в десять раз быстрее аналогов. Имеет отличные массогабаритные характеристики (вес до 65 кг), малое энергопотребление (до 780 Вт) и умеренную цену. Предусмотрено удаленное управление радиолокатором с любого абонентского поста из любой точки мира.

Проект интересен тем, что интегрирован в федеральные целевые и государственные программы РФ в области сквозных цифровых технологий, в том числе отлично «вписывается» в дорожную карту рабочей группы «Аэронет» Национальной технологической инициативы. Работая на растущем рынке, мы прогнозируем высокую доходность нового продукта (порядка 56%), быструю окупаемость инвестиций (до двух лет), минимальные риски (внутренняя норма рентабельности IRR = 292%), так как основные прикладные научные исследования и опытно-конструкторские работы уже завершены.

Данный проект имеют национальное значение для российской экономики с перспективой выхода на глобальный рынок, поднимает Россию на новый технологический уровень и повышает шансы на мировое лидерство в метеорологической радиолокации ближнего действия.

***Литература***

1. Weather radar — Part 1: System performance and operation. World Meteorological Organization, 2018.
2. Технический проект «Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и представлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С», Росгидромет. Утверждён 31.01,2014 г., с. 64. URL: http://meteorad.ru/static/TP-DMRL-2014.pdf.
3. Методическое письмо об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2019 г. ФГБУ «ЦАО». — Долгопрудный, 2020 г., 124 с. URL: http://map.meteorad.ru/static/method_letter_2019.pdf.
4. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике, третья редакция. — Москва, 2019 г., 129 с.
5. https://www.industryarc.com/Report/15651/doppler-radar-market.html.

УДК 621.396.96 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.142.145

# Автофокусировка радиолокационного изображения радиолокаторов с синтезированной апертурой в условиях отсутствия данных навигационных систем

## Autofocusing the Radar Image of Synthetic Aperture Radars in the Absence of Navigation System Data

**Переверзев А. Л., Лялин К. С., Козлов В. А., Кузьмин И. А., Хасанов М. С.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Pereverzev A. L., Lyalin K. S., Kozlov V. A., Kuzmin I. A., Khasanov M. S.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Разработан алгоритм автофокусировки радиолокационного изображения радиолокаторов с синтезированной апертурой в условиях сильных траекторных нестабильностей без использования данных навигационных систем. Проведена апробация алгоритма с использованием реальных радиолокационных данных.
**Ключевые слова:** РСА; синтез радиолокационных изображений; траекторные нестабильности.

The paper highlights an autofocusing algorithm for the radar image of synthetic aperture radars in conditions of strong trajectory instabilities without the use of navigation systems data. The algorithm was tested using real radar data.
**Keywords:** SAR; radar imaging; high vehicle motion instability.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) все чаще используются в различных областях — картография, ледовая разведка, мониторинг чрезвычайных ситуаций, сельское хозяйство, контроль целостности нефтепроводов, линий электропередач и т. д. Наблюдается тенденция к уменьшению массогабаритных характеристик и стоимости РСА в целях повышения доступности для конечных пользователей. Малые массогабаритные характеристики позволяют использовать в качестве носителя РСА небольшие беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1]. Для малых БПЛА свойственны существенные траекторные нестабильности при движении, что приводит к необходимости использования более сложных комбинированных алгоритмов автофокусировки при формировании радиолокационного изображения (РЛИ) [2–3].

Процедура формирования РЛИ осложняется тем, что на малом БПЛА невозможно разместить высокоточную инерциальную навигационную систему в связи с существенной массой и габаритами. Спутниковые навигационные системы могут быть установлены на БПЛА, однако имеют существенно меньшую точность, не позволяющую формировать РЛИ с высоким разрешением. Большинство существующих алгоритмов автофокусировки [4–5] теряют работоспособность при сильных траекторных нестабильностях, часть алгоритмов [6] работают только при наличии навигационных данных. Таким образом, вопросы разработки алгоритма автофокусировки РЛИ без использования навигационных данных являются актуальными.

В статье представлены результаты разработки и исследования пофрагментного алгоритма автофокусировки РЛИ РСА в условиях сильных траекторных нестабильностей без использования данных навигационных систем. Алгоритм включает в себя следующие шаги:

- определение размера фрагмента РЛИ (размер фрагмента может быть менее размера апертуры синтеза), для которого параметры движения носителя неизменны;
- определение параметров движения носителя, при которых достигается лучшее качество фрагмента РЛИ с использованием критериев автофокусировки;
- синтез РЛИ с параметрами движения носителя, определенными для каждого фрагмента, методом обратного проецирования.

Для фокусировки отдельных фрагментов РЛИ рассмотрен ряд критериев автофокусировки. По результатам исследований наиболее точным и надежным является критерий GLLV (gray scale local variance) [7]. Был разработан критерий автофокусировки, обеспечивающий аналогичную точность и надежность. Разработанный критерий примерно в четыре раза быстрее, чем критерий GLLV.

Проведена апробация разработанного алгоритма на РЛИ X-диапазона. Навигационные данные о движении носителя не использовались, необходимые для формирования РЛИ параметры определены непосредственно из радиолокационных данных. Полученные в результате работы алгоритма РЛИ имеют разрешение 30×30 см, что близко к наилучшему теоретически возможному разрешению для данного радиолокатора.

***Литература***


1. Переверзев А. Л., Лялин К. С., Мелешин Ю. М. и др. Компактный мультидиапазонный радар с синтезированной апертурой // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 154–156.
2. Zhang L., Sheng J., Xing M., Qiao Z., Xiong T. and Bao Z. Wavenumber-Domain Autofocusing for Highly Squinted UAV SAR Imagery // IEEE Sensors Journal. Vol. 12. № 5. P. 1574–1588, May 2012.
3. Lort M., Aguasca A., López-Martínez C. and Marín T. M. Initial Evaluation of SAR Capabilities in UAV Multicopter Platforms // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. Vol. 11. № 1. P. 127–140, Jan. 2018.
4. Azouz A. and Li Z. Improved phase gradient autofocus algorithm based on segments of variable lengths and minimum entropy phase correction. 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), 2014. P. 194–198.
5. Restano M., Seu R. and Picardi G. A Phase-Gradient-Autofocus Algorithm for the Recovery of MARSIS Subsurface Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, June 2016 Vol. 13. № 6. P. 806–810.
6. Azouz A. and Li Z. Motion compensation for high-resolution automobile-SAR, 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), 2014. P. 203–207.
7. Pech-Pacheco J. L., Cristobal G., Chamorro-Martinez J. and Fernandez-Valdivia J. Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study, Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000, 2000. Vol. 3. P. 314–317.

Synthetic aperture radars (SAR) are being increasingly used in various fields — cartography, ice reconnaissance, emergency monitoring, agriculture, monitoring the integrity of oil pipelines, power lines, etc. There is a tendency towards a decrease in the weight and size characteristics and the cost of SAR devices in order to increase the availability for the end users. Small weight and size characteristics make it possible to use small unmanned aerial vehicles (UAVs) as a SAR carrier [1]. Small UAVs are characterized by significant trajectory instabilities during movement, which leads to the need to use more complex combined autofocusing algorithms when forming the radar image [2–3].

The radar image formation procedure is complicated by the fact that it is impossible to place a high-precision inertial navigation system on a small UAV due to its significant mass and dimensions. Satellite navigation systems can be installed on UAVs, however, they have significantly lower accuracy, which does not allow generating radar images with high resolution. Most of the existing autofocusing algorithms [4–5] lose their performance in case of strong trajectory instabilities, some of the algorithms [6] work only basing on navigation data. Thus, it is revelant to develop a radar image autofocusing algorithm without the use of navigation data.

The article presents the results of the development and study of a fragment-by-fragment autofocusing algorithm for SAR images in conditions of strong trajectory instabilities without using the data of navigation systems. The algorithm includes the following steps:

- determination of the size of the radar image fragment (the size of the fragment may be less than the size of the synthesis aperture), for which the parameters of the carrier's motion may be considered stable;
- determination of the parameters of the carrier movement at which the best quality of the radar image fragment is achieved using the autofocusing criteria;
- synthesis of radar images with the parameters of the carrier movement, determined for each fragment, using the back projection method.

Several autofocus criteria have been considered for focusing individual fragments of radar images. According to the research results, the most accurate and reliable criterion is GLLV (gray scale local variance) [7]. An autofocus criterion has been developed to provide similar accuracy and reliability. The developed criterion is about 4 times faster than the GLLV criterion.

The developed algorithm was tested on the X-range radar data. The navigation data was not used, the parameters necessary for the formation of the radar data were determined directly from the radar data. The radar images obtained as a result of the operation of the algorithm have resolution of 30×30 cm, which is close to the best theoretically possible resolution for this radar.

***References***

1. Pereverzev A. L., Lyalin K. S., Melyoshin Yu. A. i dr. Kompaltniy multidiapazonniy radar s sintezirovannoy aperturo // Nanoindustriya, 2020. T. 13. S4(99). P. 154–156. (In Russian).
2. Zhang L., Sheng J., Xing M., Qiao Z., Xiong T. and Bao Z. Wavenumber-Domain Autofocusing for Highly Squinted UAV SAR Imagery // IEEE Sensors Journal. Vol. 12. № 5. P. 1574–1588, May 2012.
3. Lort M., Aguasca A., López-Martínez C. and Marín T. M. Initial Evaluation of SAR Capabilities in UAV Multicopter Platforms // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. Vol. 11. № 1. P. 127–140, Jan. 2018.

4. Azouz A. and Li Z. Improved phase gradient autofocus algorithm based on segments of variable lengths and minimum entropy phase correction. 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), 2014. P. 194–198.
5. Restano M., Seu R. and Picardi G. A Phase-Gradient-Autofocus Algorithm for the Recovery of MARSIS Subsurface Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, June 2016. Vol. 13. № 6. P. 806–810.
6. Azouz A. and Li Z. Motion compensation for high-resolution automobile-SAR. 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), 2014. P. 203–207.
7. Pech-Pacheco J. L., Cristobal G., Chamorro-Martinez J. and Fernandez-Valdivia J. Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study, Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000, 2000. Vol. 3. P. 314–317.

УДК 621.371.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.146.149

# Оценка бюджета нисходящего канала спутниковой системы связи для технологии NB-IoT

## Link Budget Estimation for Downlink Satellite Communication System for NB-IoT Technologies

**Михайлов В. Ю.[1], Котляров Е. Ю.[1,2], Нуйкин А. В.[1]**
*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*vmikhaylov@niime.ru*

**Mikhailov V. Y.[1], Kotlyarov E. Y.[1,2], Nuykin A. V.[1]**
*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*vmikhaylov@niime.ru*

В работе рассматривается возможность создания канала связи между космическим аппаратом и абонентским терминалом узкополосного Интернета вещей (NB-IoT) в рамках нововведений, представленных в 3GPP Release 17. Приведена оценка бюджета нисходящего канала связи для различных диапазонов частот.
**Ключевые слова:** 5G; NB-IoT; Release 17; распространение радиоволн; спутниковые системы связи.

This paper discusses the possibility of creating a communication channel between the spacecraft and the subscriber terminal of the narrowband Internet of Things (NB-IoT) within the framework of the innovations presented in 3GPP Release 17. Downlink budget for different frequency bands has been estimated.
**Keywords:** 5G; NB-IoT; Release 17; radiowave propagation; satellite communication systems.

Применение неназемных сетей в 5G приведено в технических отчетах 3GPP [1–2]. В качестве основного решения предлагается использовать спутниковые системы связи, так как это позволит обеспечить покрытие труднодоступных районов (горные цепи, заполярье, пустыни). Покрытие при таком решении будет осуществляться группировкой низкоорбитальных спутников, а также геостационарными спутниками для конкретных случаев. Оптимальным решением является использование спутниковых систем, выполненных на отечественной элементной базе [3], что, в свою очередь, окажет положительное влияние на наукоемкие отрасли промышленности Российской Федерации [4].

Существует несколько сценариев развертывания спутникового сегмента:

- абонент — космический аппарат (КА) — наземная станция — сеть (см. рис. 1);
- абонент — КА или летательный аппарат — ретранслятор — наземная станция — сеть (см. рис. 1 и 2).

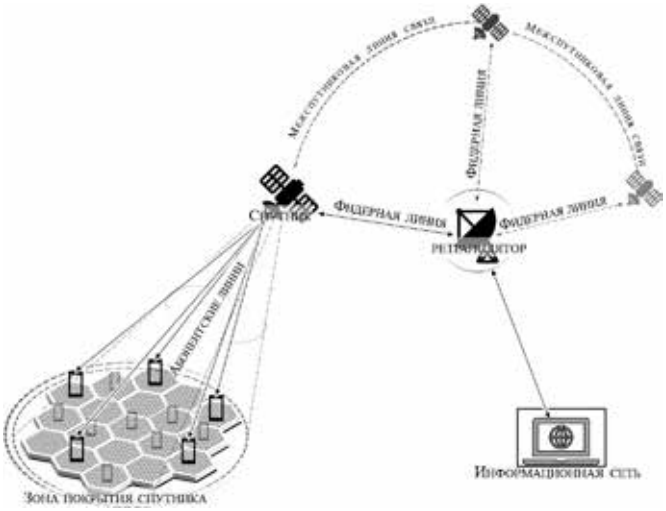



**Рис. 1.** Сценарий связи без ретранслятора и с космическим аппаратом в качестве ретранслятора (пунктир)

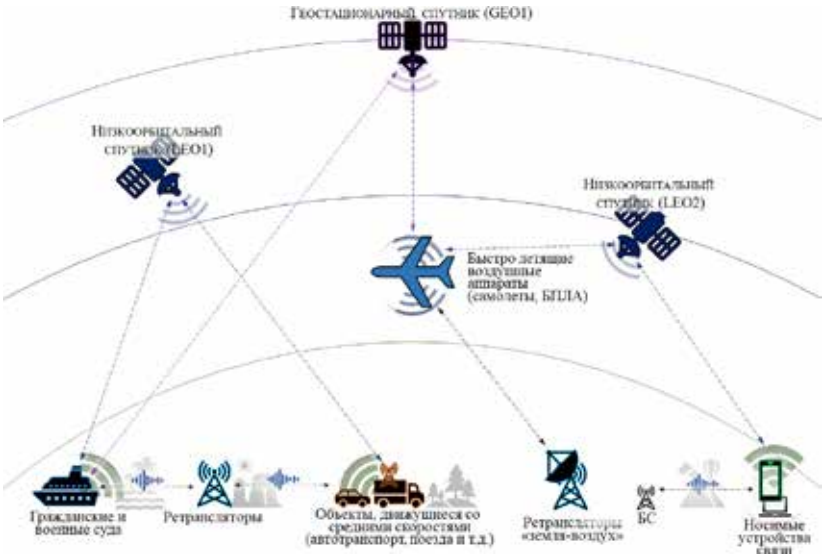



**Рис. 2.** Сценарий связи с различными типами ретрансляторов

Развертывание спутникового сегмента для непосредственного взаимодействия с устройствами, работающими на базе технологии NB-IoT, будет затруднено следующими проблемами:

1) ограничение мощности абонентского терминала в восходящем канале связи;
2) эффект Доплера;
3) загруженность геостационарных орбит;
4) загруженность частотных диапазонов.

Согласно регламенту для спутниковой радиосвязи выделено несколько диапазонов частот, часть из которых пересекается с диапазонами частот для FR1 и FR2.

Наибольший вклад в суммарные потери при распространении радиоволн вносят дистанционные потери мощности, которые определяются моделью свободного пространства [5]. На рис. 3 приведен график зависимости потерь при распространении радиоволн в свободном пространстве в зависимости от угла места для частотных диапазонов, выделенных в России для 5G [6–8]. Также для сравнения приведены частоты 1474,5 МГц, соответствующая n50 и L-диапазону, и 3800 МГц, соответствующая n77 и являющаяся приоритетной при развертывании 5G. Суммарные потери с учетом потерь в гидрометеорах [9–10], потерь в атмосферных газах [11] в нисходящем канале приведены на рис. 4.

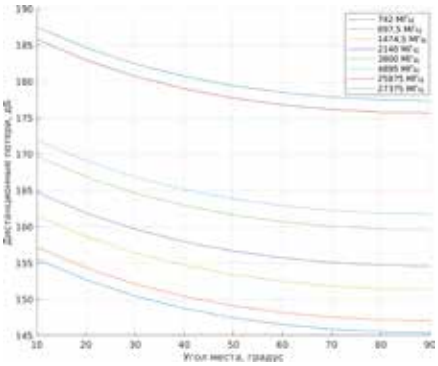



**Рис. 3.** Дистанционные потери мощности для орбиты 600 км

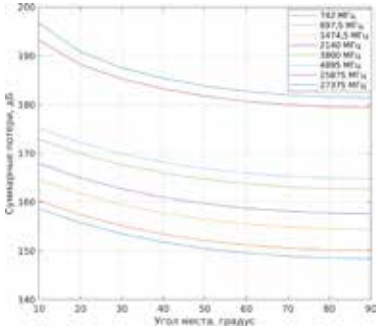



**Рис. 4.** Суммарные потери мощности для орбиты 600 км

На рис. 5 приведены зависимости эффективных изотропно излучаемых мощностей (ЭИИМ) от отношения сигнал/шум для скорости передачи информации 250 кбит/с в разных частотных диапазонах при угле места 5°, рассчитанные соответствии с [12].

Достижение прямого канала связи между космическим аппаратом и абонентским терминалом возможно при использовании частот до 2 ГГц и орбиты 600 км. Однако потребуется уточнение ЭИИМ при реализации других технологий радиодоступа, включенных в 5G.

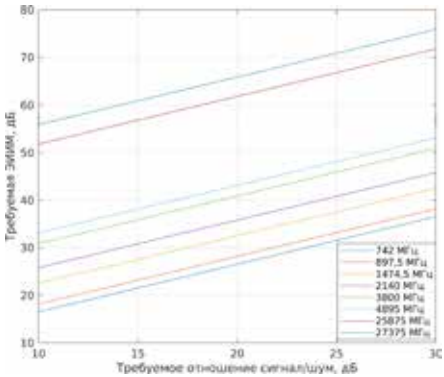



**Рис. 5.** Зависимость ЭИИМ от требуемого отношения сигнал/шум

***Литература***


1. 3GPP TS 38.821 Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) V16.0.0, January 2020.
2. 3GPP TR 36.763 Study on Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT) / enhanced Machine Type Communication (eMTC) support for Non-Terrestrial Networks (NTN) V0.3.0, May 20213. МСЭ-R P.525.
3. Красников Г. Я., Эннс В. И. Экспертиза применения электронной компонентной базы при создании аппаратуры космического и специального назначения — важный шаг в решении задачи импортозамещения // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2021. — № 1 (181). — С. 12–17.
4. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
5. Рекомендация МСЭ-R P.525-4. Расчет ослабления в свободном пространстве.
6. Заседание Государственной комиссии по радиочастотам от 23 ноября 2020 г. Протокол № 20-56дсп.
7. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 25 июля 2019 г. № 19-51-01 «Об использовании полос радиочастот радиоэлектронными средствами связи пятого поколения» (с изменениями и дополнениями).
8. Приказ Минкомсвязи России № 923 «Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации».
9. Рекомендация МСЭ-R P.837-7. Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн.
10. Рекомендация МСЭ-R P.838-3. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.
11. Рекомендация МСЭ-R P.676-12. Затухание в атмосферных газах.
12. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание. — М.: Вильямс, 2003.

УДК 621.396.967 + 621.396.969 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.150.152

# Малогабаритная модульная платформа многодиапазонного радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли для БПЛА

## Compact Modular Multi-band Radar Remote Sensing Platform for UAV

**Лялин К. С., к. т. н., Переверзев А. Л., к. т. н., Кузьмин И. А., Шеремет А. Ю., Довгаль Т. А.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*dj303@mail.ru*

**Lyalin K. S., Ph.D, Pereverzev A. L., Ph.D, Kuzmin I. A., Sheremet A. Y., Dovgal T. A.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*dj303@mail.ru*

При проведении широкого спектра задач, от крупных геологических изысканий и прокладки маршрутов в ледовых полях до дефектоскопии и земледелия, востребованы различные методы зондирования Земли. Существенной проблемой при этом является необходимость использования пилотируемой авиации для проведения радиолокационного зондирования, а также недостатки оптических систем. В рамках доклада предложено решение — модульный малогабаритный многодиапазонный комплекс с возможностью размещения на широком спектре носителей, включая БПЛА, предназначенный для дистанционного зондирования Земли с синтезом апертуры. Описан вариант технической реализации.
**Ключевые слова:** БПЛА; синтез апертуры; модульный радиолокатор.

A wide spectrum of tasks — from geological research and pathfinding in ice fields to flaw detection and agriculture — generates demand for remote Earth sensing. A significant problem is the necessity of using manned aerial vehicle carriers, as well as flaws of optical systems. A solution has been proposed: compact modular multi-band radar platform suitable for installation on a wide spectrum of carriers, including small UAV, designed for remote Earth sensing application using SAR. A design of technical implementation has been provided.
**Keywords:** UAV; SAR; modular radar.

С помощью радиолокационного зондирования Земли можно решать широкий спектр задач, однако оборудование, требуемое для каждой конкретной задачи, зачастую узкоспециализировано. Это происходит из-за различных требований к несущим частотам, ширинам полос, типам зондирующих сигналов и другим параметрам. В настоящее время существует малогабаритное оборудование, позволяющее решать одну или несколько близких задач. Универсальные решения имеют высокую цену и достаточно большие габариты, что предполагает использование пилотируемого носителя. В свою очередь, это приводит к необходимости подбора

посадочных площадок, получения разрешения на проведение авиационных работ, наличия квалифицированного пилота.

В статье предложен вариант модульной малогабаритной платформы многодиапазонного радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли для БПЛА. Высокая разрешающая способность комплекса, не хуже 25 см, а также универсальность достигаются за счет радиочастотного интерфейса блока формирования и обработки сигналов, работающего на несущей частоте 1,2 ГГц и имеющего рабочую полосу в 580 МГц. Управление комплексом, первичную обработку и запись осуществляет вычислительная система на основе Xilinx Zynq XC7Z100-2FF900E.

Многодиапазонность достигается за счет присоединения к блоку формирования и обработки сменных модулей преобразования частоты и усиления.

Такой подход позволяет реализовывать широкий спектр задач без изменения программного обеспечения блока формирования и обработки. Стандартизированный интерфейс к аналоговым блокам позволяет в короткие сроки и с малыми затратами реализовывать решения для различных частотных диапазонов и мощностей.

Продуманная конструкция сменных блоков позволяет заменять их без привлечения квалифицированного персонала в полевых условиях в короткое время.

Малая масса и габариты позволяют устанавливать платформу на БПЛА максимальной взлетной массой до 30 кг, что по действующему законодательству делает достаточно простой процедуру регистрации носителя и получение разрешения для полетов. Кроме того, возможность установки комплекса на носители вертолетного и мультироторного типов позволяют работать с ограниченных площадок, что существенно расширяет географию применения и упрощает подготовку к запуску.

***Литература***

1. Meleshin Y., Khasanov M., Zatonskaya A., Biryuk A., Merkulova Z. Development Of A Small-sized Ku-band Step-frequency SAR // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2021.
2. Design of C-band Dual-polarized waveguide slot Antenna for Spaceborne SAR // 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 2020.
3. Design of Ka-band Amplifier Based on SAR Imaging // 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2019.

Radar remote sensing can accomplish a wide range of tasks, however hardware required for each individual job is often highly specialized. The reason is different requirements for carrier frequencies, frequency bands, signal waveforms and other parameters. At the moment there are examples of hardware capable of accomplishing one or multiple closely related tasks. Universal solutions are expensive and often oversized and require manned vehicle carriers, which results in requirements for suitable landing areas, permissions for aerial operation, and highly qualified personnel.

We propose a design of compact modular SAR platform for UAV. High resolution of 0,25 m and versatility are achieved by implementing RF interface for signal generation and processing unit with central frequency of 1,2 GHz and working frequency band

of 580 MHz. Control and initial processing is carried out by computational unit based on Xilinx Zynq XC7Z100-2FF900E.

Multiband operation is achieved by connection to interchangeable RF conversion and amplification units.

The proposed approach allows one to perform wide spectrum of tasks without modifications of signal generation and processing unit's software. Unified analog RF units' interface allows a swift deployment for different frequency bands and power requirements.

Interchangeable unit design allows one to quickly replace modules in the field without highly qualified personnel.

Small mass and dimensions make it possible to install the platform on UAV with take-off weight of 30 kg. According to the current legislation this class of UAV is easy to register and acquire flight permits. Additionally, the possibility to install the proposed platform on helicopter and multi-rotor type carriers allows operating without a long runway, which increases accessible areas and simplifies flight preparation.

***References***

1. Meleshin Y., Khasanov M., Zatonskaya A., Biryuk A., Merkulova Z. Development Of A Small-sized Ku-band Step-frequency SAR, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2021.
2. Design of C-band Dual-polarized waveguide slot Antenna for Spaceborne SAR, 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 2020.
3. Design of Ka-band Amplifier Based on SAR Imaging, 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2019.

УДК 334.02 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.153.154

# Обеспечение повышения качества управления — ключевой фактор решения задачи ускорения темпа развития микроэлектроники

## To Ensure Management Quality Improvement is the Key Factor for Solving the Task of Microelectronics Development Rate Acceleration

**Медвехкв Н. С.**
*ООО «НПП «ПРИМА»*
*603950, г. Нижний Новгород, Сормовское ш., 1Ж*
*medvekhkv-ns@prima.nnov.ru*

**Medvekhkv N. S.**
*PRIMA RPE LLC*
*1Zh Sormovskoye Hwy., Nizhny Novgorod, 603950*
*medvekhkv-ns@prima.nnov.ru*

Описаны связанные с интеграцией технологий перспективы развития информационно-управляющих систем. Указано на превалирующую роль вопросов организации. Предложено расширение требований и мер поддержки к заявителям для повышения качества управления инновационными проектами в области микроэлектроники.
**Ключевые слова:** информационно-управляющие системы; интеграция технологий; организационные проблемы; меры поддержки; уровни зрелости; повышение квалификации; опережающее развитие.

The article describes integration of technologies related prospect for information and management systems development, stressing the prevailing role of organizational issues. Increased requirements and support measures have been proposed for applicants to improve the quality of innovative projects management in the field of microelectronics.
**Keywords:** information and management systems; integration of technologies; organizational issues; support measures; maturity level; skills development; advanced development.

Основной барьер, препятствующий опережающему развитию инновационной деятельности, в частности касающийся разработки информационно-управляющих и радиотехнических систем, приобретает все более возрастающий со временем организационный характер. Абстракция цифрового представления информации привела к выделению информатики в отдельную дисциплину. Из-за независимого развития произошло отдаление информатики и раздела физики «Электричество» друг от друга. Глубокая интеграция фундаментальной естественной и прикладной формальной наук способна реализовать возможности, недоступные при поддержании между ними простого интерфейса. Создание одним человеком находящегося на современном уровне науки и техники продукта невозможно ввиду невозможности охвата необходимого для этого объема знаний. Организация ритмичного процесса разработки с большим количеством участников, затрагивающего проработку

научных и практических вопросов на стыке дисциплин, — актуальный вызов управления инновационной деятельностью. Приоритет в деятельности участников рынка микроэлектроники и связанных с ней институтов поддержки, направленный на комплексное решение проблем такой организации, является ключевым фактором сокращения технологического разрыва в данной отрасли с возможностью тиражирования положительного опыта на другие направления инновационной деятельности.

В статье предлагаются:

- требования, предъявляемые к субсидируемым проектам и способствующие повышению шанса их успешной реализации;
- комплементарные меры поддержки, финансируемые из части субсидий;
- эволюционный подход — от принудительно-обеспечительного порядка к культуре управления как основному критерию конкурентоспособности заявителя.

The main barrier hindering the advanced development of innovative activity, in particular, concerning the development of information-management and radio-technical systems, acquires ever-growing organizational nature. Abstraction of proving information in the digital form has led to distinguishing the computer science as a separate discipline. Due to independent development the computer science and electricity as a branch of physics became separated. Deep integration of the fundamental natural science and applied formal science can implement capabilities that are unattainable while maintaining a simple interface between them. One person cannot create a product at the modern level of science and technology, as he cannot comprehend the full scope of required knowledge. Proper organization of a rhythmic development process, involving a large number of participants, concerning the deep study of scientific and practical issues at the nexus of various disciplines is the vital challenge in the area of innovative activities management. The priority for the microelectronics market participant's activities and related support institutions, aimed at comprehensive solution of problems in such an organization, is the key factor in reducing the technological gap in this branch, providing the possibility of replicating positive experience in other innovative directions.

The article provides:

- requirements for the subsidized projects increasing the chances of their successful implementation;
- complementary support measures, partially financed from the subsidies;
- evolutionary approach, from enforcement and provisional measures to managerial culture as the main criteria for the applicant's competitiveness.

УДК 681.323 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.155.156

# Имитатор радиолокационной обстановки для устройств цифровой обработки сигналов систем ближней радиолокации

## Radar Environment Simulator for Digital Signal Processing Devices of Short-Range Radar Systems

**Анисимова М. А., Силантьев А. М., Переверзев А. Л.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*mar-ansimovaa@yandex.ru*

**Anisimova M. A., Silantiev A. M., Pereverzev A. L.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*mar-ansimovaa@yandex.ru*

В работе рассматриваются проблемы верификации цифровой части частотно-модулируемых систем ближней радиолокации в лабораторных условиях. Предложены архитектура имитатора и его техническая реализация на основе ПЛИС, обеспечивающая формирование информационного сигнала для устройств ЦОС СБРЛ, имитирующего до 1000 блестящих точек.
**Ключевые слова:** системы ближней радиолокации; имитатор радиолокационной обстановки; частотная модуляция.

This paper discusses the problems of verifying the digital part of frequency modulated short-range radar systems in laboratory conditions. Besides, it presents the architecture of the simulator and its technical implementation based on the FPGA, which provides the formation of an information signal for DSP devices of short-range radar systems, simulating up to 1000 shiny points.
**Keywords:** short-range radar systems; radar simulator; frequency modulation.

Системы ближней радиолокации (СБРЛ) применяются в различных отраслях деятельности человека от охраны объектов до систем помощи водителю. Характерной особенностью СБРЛ является соизмеримость расстояния до объекта наблюдения с его геометрическими размерами, что оказывает существенное влияние на формирование эхо-сигналов и применяемые методы обработки полученной информации [1]. При проектировании и производстве устройств цифровой обработки сигналов (ЦОС) СБРЛ существует необходимость имитации различной радиолокационной обстановки в лабораторных или цеховых условиях. Наличие таких средств имитации позволит значительно сократить инновационный цикл и уменьшить затраты на испытания. В настоящее время существует ряд подобных имитаторов, моделирующих не только радиолокационную обстановку, но и СВЧ-тракты, однако ввиду своей сложности для некоторого круга задач они являются избыточными.

В рамках работы предложены архитектура и техническая реализация имитатора сложной радиолокационной обстановки, состоящей из большого количества блестящих точек, для проверки устройств ЦОС СБРЛ. Важным требованием являлась реализация на базе стандартных и доступных компонентов. Объект

тестирования имитатора является частью СБРЛ, которая генерирует зондирующий сигнал с частотной модуляцией при помощи генератора, управляемого напряжением, и принимает ответный эхо-сигнал, преобразуемый на смесителе в сигнал биений, используемый устройствами ЦОС для дальнейшей обработки. Входными параметрами имитатора являются не только количество блестящих точек и их характеристики (расстояние до антенн, скорость, ЭПР), параметры антенн, но и перестроечная характеристика ГУН. Входным и выходным сигналом являются, соответственно, моделирующий сигнал ГУН и сигнал биений, содержащий информацию о дальности и скорости объекта наблюдения.

Имитатор представляет собой программного-аппаратный комплекс, сопрягаемый с цифровой частью частотно-модулирующих СБРЛ [2].

Программная часть имитатора, выполненная на ПК на языке Python, реализует интерфейс с пользователем, отвечает за задание сценария тестирования (радиолокационной обстановки) и формирование параметров объектов, разбитых на блестящие точки для последующей их передачи на аппаратную часть.

Аппаратная часть имитатора представляет собой конвейерную структуру, входным сигналом которой является моделирующий сигнал, а выходным — сигнал биения. В состав аппаратной части включен ряд последовательно соединенных вычислительных блоков: дешифратор, преобразующий отсчеты моделирующего сигнала в значения частот зондирующего сигнала в соответствии с перестроечной характеристикой ГУН, блок, рассчитывающий значения амплитуды, частоты и фазы эхо-сигнала в соответствии с параметрами блестящей точки, и модуль, производящий расчет сигнала биения. Стоит отметить, что в отличие от реального смесителя на выходе модуля не образуются суммы и разности всех кратных частот, рассчитывается только полезная частота сигнала биения.

Архитектура имитатора была апробирована на прототипе, реализованном на базе ПЛИС xc7a35t Xilinx, вычисляющем сигнал биения от двух блестящих точек. Диапазон имитируемых расстояний варьируется от 1,875 до 500 м с шагом 1,875 м (для частоты дискретизации АЦП 80 МГц), значение минимального расстояния и шага можно уменьшить, используя для реализации имитатора АЦП с большей частотой дискретизации. Диапазон имитируемых скоростей целей меняется от нуля до трех махов.

Было произведено сравнение спектра сигнала биения, полученного на прототипе, со спектром, полученным на математической модели. Погрешность частоты сигнала биения имитатора не превысила дискрета частоты спектра. Была произведена аналитическая оценка значения количества блестящих точек, возможных для имитации на ПЛИС xcku115flva1517-3sg, их количество составило 1050.

***Литература***

1. Коган И. М. Ближняя радиолокация. — М.: Сов. Радио, 1973. — С. 3–28.
2. Гоноровский И. С. Частотная модуляция и ее применения. — М.: Связьиздат, 1948. — С. 10–16.

УДК 004.052 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.157.159

# Открытая платформа ускорения верификации цифровой аппаратуры и систем на кристалле

## Open-source Digital Design/System on Chip Verification Acceleration Platform

**Переверзев А. Л., Силантьев А. М., Солодовников А. П.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*pal@olvs.miee.ru, silantiev@org.miet.ru, hepoh@org.miet.ru*

**Pereverzev A. L., Silantiev A. M., Solodovnikov A. P.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*pal@olvs.miee.ru, silantiev@org.miet.ru, hepoh@org.miet.ru*

Предложена открытая архитектура платформы ускорения верификации цифровой аппаратуры и систем на кристалле на основе доступных для индивидуальных разработчиков средств. Ускорение достигается путем переноса вычислений результата воздействий на тестируемое устройство из симулятора в реальную либо эмулируемую в ПЛИС аппаратуру посредством программного интерфейса. Разработан прототип платформы, продемонстрировавший реальное увеличение скорости выполнения тестов по сравнению с симуляцией.
**Ключевые слова:** архитектура; верификация; система на кристалле; ПЛИС; SystemVerilog; DPI.

The paper presents an open-source architecture of the SoCs and digital designs verification acceleration platform affordable for individual developers. Acceleration is achieved by transferring the calculations of the design under test output result to test stimulus from the simulator to the real or FPGA emulated hardware by using the software interface. As proof of concept a prototype has been developed.
**Keywords:** architecture; verification; System on Chip; FPGA; SystemVerilog; DPI.

Увеличение степени интеграции систем на кристалле и цифровой аппаратуры обеспечило значительный рост производительности и расширение функциональных возможностей изделий, что привело к усложнению процесса их проектирования. Возросла значимость процесса верификации создаваемых изделий, на который может быть направлено более 50% ресурсов проекта. Ускорение процесса верификации является актуальной задачей, для решения которой ведущие разработчики САПР создают специализированные программно-аппаратные комплексы, позволяющие воспроизводить функционирование RTL-описания аппаратуры с реальными тактовыми частотами до единиц МГц. Такие частоты обеспечивают на несколько порядков бóльшую [2] скорость выполнения тестов по сравнению с симуляцией. Эти устройства называются эмуляторами и в связи со своей дороговизной могут использоваться только крупными компаниями. В то же время важно отметить доступность инструментов маршрута проектирования для отдельных студентов, университетов, малых и средних компаний. Однако для использования

полноценного маршрута проектирования не хватает инструментария для ускорения верификации.

В работе представлена открытая архитектура платформы ускорения верификации. В ее основе лежит программная часть, связывающая окружение симулятора с аппаратурой посредством программного интерфейса DPI, а также аппаратный адаптер, отвечающий за обмен тестовыми воздействиями и выходными сигналами между тестируемым устройством и программной частью аппаратуры. Это позволяет увеличить скорость проведения тестов, а связь с симулятором позволяет повторно использовать тестовое окружение с предыдущих этапов верификации, что так же положительно сказывается на временных затратах при верификации.

Данная архитектура не привязана к конкретному программно-аппаратному инструментарию верификации конкретных компаний-разработчиков и может быть гибко адаптирована под конкретные нужды и размер проекта. Преимущество данной архитектуры заключается в возможности создания платформы из доступных средств: минимальные требования заключаются в наличии рабочего компьютера с симулятором, поддерживающим SystemVerilog DPI, и стенда с ПЛИС, на котором расположен высокоскоростной порт, такой как PCI-E/Ethernet, который можно использовать для подключения к рабочему компьютеру. Это открывает новые возможности в области низкобюджетной верификации цифровых устройств.

Предложенная архитектура платформы была реализована на базе отладочной платы Xilinx Zynq-7000 SoC ZC702 Evaluation Kit в соответствии с рис. 1.

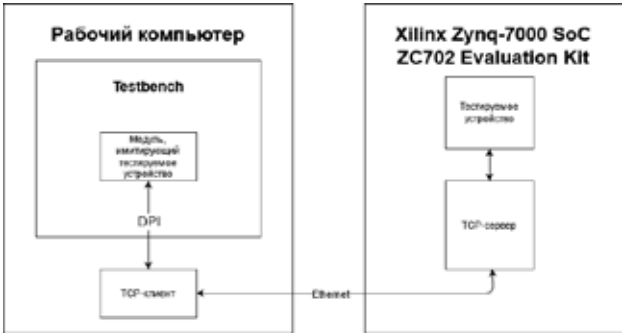



**Рис. 1.** Блок-схема реализованной платформы

**Таблица 1.** Сравнение реализованной платформы с другими способами верификации

| Способ верификации | Порядок тактовой частоты, Гц | Порядок сложности тестируемого дизайна, вентили | Порядок стоимости, $ |
|---|---|---|---|
| Симуляция | $10–10^4$ [2] | $10–10^6$ | $10^3$ |
| Эмуляция | $10^7$ | $10^9$ | $10^7$ |
| Платформа верификации | $10^4$ | $10^9$ | $10^4$ |

Были произведены замеры скорости симуляции, из которых следует что начиная со сложности в 1 млн вентилей скорость выполнения тестов с использованием платформы на два порядка обходит скорость симуляции тестов с использованием симулятора QuestaSim на процессоре Intel Core i7-9700K.

Важно отметить, что после производства тестируемой системы на кристалле либо цифровой аппаратуры ее можно подключить к выводам интерфейсов отладочного стенда для выполнения тестов с предыдущих этапов, чего нельзя добиться ни одним другим из представленных способов верификации.

***Литература***

1. The Weather Report: 2018 Study On IC/ASIC Verification Trends [Электронный ресурс]. URL: https://semiengineering.com/the-weather-report-2018-study-on-ic-asic-verification-trends (дата обращения: 11.08.21).
2. Pre-Silicon Verification Using Multi-FPGA Platforms [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.1007/s10836-021-05929-1 (дата обращения: 11.08.21).

УДК 621.316.718.5 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.160.162

# Проблемы разработки универсальной модульной платформы управления электроприводами

## Problems of Developing a Universal Modular Electric Drive Control Platform

**Воробьёв М. М., Лялин К. С., Меньшов А. А., Суворов Д. А., Филимонов Р. Э., Якунин А. Н.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*mixache@list.ru, kslyalin@gmail.com, aleksandermenshov@gmail.com, sur0vy@yandex.ru, fil.rmn@gmail.com, yakunin@olvs.miee.ru*

**Vorobev M. M., Lialin K. S., Menshov A. A., Suvorov D. A., Filimonov R. E., Yakunin A. N.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*mixache@list.ru, kslyalin@gmail.com, aleksandermenshov@gmail.com, sur0vy@yandex.ru, fil.rmn@gmail.com, yakunin@olvs.miee.ru*

Рассматриваются этапы разработки цифровой модульной системы управления приводами и электродвигателями различного типа, сложности и проблемы, с которыми пришлось столкнуться на этапе разработки, а также пути и методы их решения.
**Ключевые слова:** электродвигатели; программное обеспечение; система управления; микроконтроллер.

This article discusses the stages of developing a digital modular control system for drives and electric motors of various types, the complexities and problems that had to be faced at the development stage, as well as ways and methods of their solution.
**Keywords:** electric motors; software; control system; microcontroller.

Процесс разработки технически сложных электронных изделий зачастую требует уделить особенное внимание проработке не только технической составляющей, но и вопросов, связанных с эффективностью и надежностью. Данный процесс необходимо наиболее полно выполнить на этапе предварительного проектирования. Это не позволит избавиться от всех возможных ошибок и недоработок, особенно при необходимости укладываться в достаточно сжатые сроки, характерные для нынешних тенденций развития электронной промышленности, однако позволит сократить количество итераций доработок в рамках всего проекта, что, в свою очередь, сократит сроки вывода готовой продукции на рынок, тем самым увеличив экономический эффект от его разработки. В процессе проектирования универсальной модульной платформы управления приводами, которая выполняется в рамках проекта по созданию серийного производства, необходимо было решить ряд важных проблем, возникших в результате предполагаемого функционала и выбранной архитектуры конечного изделия, вот некоторые из них:

- проблема проектирование такой архитектуры, которая позволяет наиболее оптимальным и эффективным способом управлять разными типами

электродвигателей. Основная идея при решении данной задачи заключается в применении набора силовых модулей, каждый из которых используется для своего круга задач, но не более, это позволяет повысить КПД и частично минимизировать избыточность, заведомо характерную для любых универсальных систем. Более детально архитектура изделия представлена в [1];

- проблема повышения надежности отдельных модулей, а также повышение срока службы изделия в целом и его высокая ремонтопригодность. Данная задача решается путем применения определенных схемотехнических приемов, непрерывным мониторингом состояния модулей, а также возможностью замены составных частей изделия при их выходе из строя, что является следствием выбранной архитектуры изделия;
- сложность разработки алгоритмов управления разными типами и видами двигателей. Хотя в основе своей применяется широко известное векторное управление [2], тем не менее данный алгоритм управления должен учитывать конкретную модель «двигатель — датчик положения ротора», а для систем без датчика обратной связи необходимо его модернизировать и дорабатывать;
- сложность комплексных испытаний, для проведения которых необходима большая номенклатура двигателей, датчиков обратной связи и комплектующих к ним. Данное ограничение приводит к увеличению времени проверки, к усложнению контрольно-проверочной аппаратуры. Для минимизации времени и финансовых затрат был проведен анализ и выбран минимальный набор объектов проведения испытаний, а также разработана оснастка для проведения испытаний.

В ходе проектирования и выполнения работ были сформулированы проблемы, решение которых является неотъемлемой частью процесса разработки, большинство удалось избежать благодаря работе, проделанной на этапе проектирования, некоторые были устранены путем переработки схем и программного обеспечения в процессе работы с макетом, однако работа по данному проекту еще продолжается и, возможно, конечный вид изделия вновь будет улучшен.

***Литература***

1. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9396563.
2. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). — ЭФО, 2013. — 72 с.

The process of developing technically complex electronic products often requires special attention to be paid not only to the technical component, but also to issues related to efficiency and reliability. This process should be carried out to the fullest extent possible at the preliminary design stage. This will not do away with all the possible mistakes and shortcomings, especially if it is necessary to meet rather tight deadlines, which are characteristic of the current trends in the development of the electronics industry, however, it will reduce the number of iterations of rework within the whole project, which in its turn will reduce the time for bringing the finished product to market, thereby increasing the economic effect of its development. In the process of designing a universal modular drive control platform,

which is carried out within the framework of the project on creating serial production, it was necessary to solve a number of important problems, resulting from the assumed functionality and the chosen architecture of the final product, here are some of them:

- The problem of designing an architecture that allows the best and most efficient way to control different types of electric motors. The main idea in solving this problem is to use a set of power modules, each of which is used for its range of tasks, but no more, it allows increasing efficiency and partially minimizing redundancy, known to be typical for any universal system. The architecture of the product is presented in more detail in [1].
- The problem of increasing the reliability of individual modules, as well as increasing the service life of the product as a whole and its high maintainability. This problem is solved by applying certain circuit techniques, continuous monitoring of the state of the modules, as well as the possibility of replacing the components of the product, when they fail, which is a consequence of the chosen architecture of the product.
- The complexity of developing control algorithms for different types and kinds of engines. Although it is based on the well-known vector control [2], nevertheless, this control algorithm must take into account the specific "motor-rotor position sensor" model, and for systems without a feedback sensor it is necessary to upgrade and refine it.
- Difficulty of complex tests, which require a large nomenclature of motors, feedback sensors and their accessories. This limitation leads to an increase in testing time, to complication of control and testing equipment. To minimize time and financial costs, an analysis has been performed and a minimum set of test objects has been selected, and test equipment has been developed.

During design and performance of the work, problems were formulated, whose solution is an integral part of the development process, most of them were avoided due to the work done during the design phase, some were eliminated by reworking of schemes and software in the process of working with the layout, however, the work on this project is still going on and probably the final appearance of the product will be improved again.

*References.*

1. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9396563.
2. Kalachev Yu. N. Vektornoe regulirovanie (zametki praktika), EFO, 2013. 72 p. (In Russian).

УДК 62-523.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.163.166

# Структура программного обеспечения и алгоритм работы платформы управления электродвигателями

## Software Structure and Operation Algorithm of the Electric Motor Control Platform

**Воробьёв М. М., Лялин К. С., Суворов Д. А., Филимонов Р. Э.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*mixache@list.ru, kslyalin@gmail.com, sur0vy@yandex.ru, fil.rmn@gmail.com*

**Vorobev M. M., Lialin K. S., Suvorov D. A., Filimonov R. E.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*mixache@list.ru, kslyalin@gmail.com, sur0vy@yandex.ru, fil.rmn@gmail.com*

Рассматриваются структура программного обеспечения, алгоритмы управления двигателями и способы унификации цифровой модульной системы управления приводами и электродвигателями различного типа.
**Ключевые слова:** электродвигатели; микроконтроллер; программное обеспечение; векторное управление.

This article discusses the structure of the software, the algorithms of motor control and the ways of unifying the digital modular control system for drives and electric motors of various types are considered.
**Keywords:** electric motors; microcontroller; software; vector control.

Модульная платформа управления электроприводами разрабатывается в целях унификации производства электроники управления двигателями. Архитектура платформы предполагает ее применение для широкого спектра задач, основным ее преимуществом является возможность комбинировать различные составные части для подбора требуемых характеристик (см. рис. 1).

**Рис. 1.** Архитектура платформы управления электроприводами

Множество моментов, связанных с возможностью расширения области применения универсальных систем, решается путем применения составной архитектуры, позволяющей использовать разные физические блоки для решения специфических задач: модули обратной связи — для подключения датчиков положения ротора, модули интерфейсов — для подключения к различным линиям передачи данных в целях организации управления, модули питания и силовые модули полумостов подбираются под конкретные типы двигателей исходя из мощности и типа. Такой подход широко используется при разработке электронных изделий, однако, с другой стороны, ряд задач гораздо эффективнее решать, используя универсальный модуль, способный автоматически или путем ручной настройки выполнять эти задачи. В универсальной модульной платформе управления электроприводами функции такого модуля выполняет модуль контроллера, и в частности программное обеспечение, разработанное для него. Симбиоз таких подходов позволяет максимально эффективно раскрыть функциональные возможности платформы, обеспечить надежность работы, увеличить КПД и расширить перспективы ее применения, будь то управление высокопроизводительными мощными насосами для нефтяной промышленности, управление запорными механизмами или управление складскими грузовыми тележками, самокатами и другими подвижными средствами.

Основой программного обеспечения является векторное управление двигателем, оно является широко применяемым подходом, но в данном случае нельзя заложить один алгоритм и набор параметров для разных двигателей, так как основная идея заключается именно в том, что заранее неизвестно, какой конкретно двигатель будет подключен, так же как и неизвестна математическая модель этого двигателя; есть только тип и основные характеристики двигателя, задавая которые, мы должны получить возможность им управлять. Некоторые параметры являются константными для связки двигатель — датчик обратной связи, другие позволяют изменять параметры вращения: подбирая их, можно оптимально настроить работу под конкретную задачу.

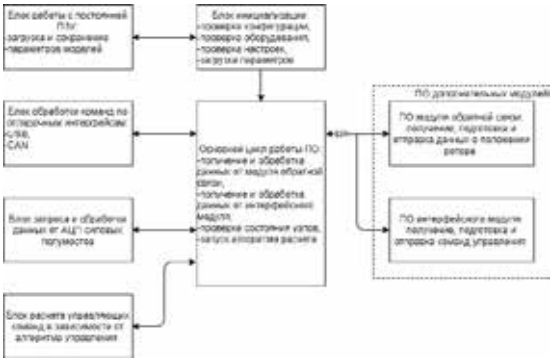



**Рис. 2.** Структура программного обеспечения модуля контроллера платформы управления электроприводами

Однако следует также понимать, что программное обеспечение — это не менее сложный компонент системы, чем аппаратная составляющая, и он требует подчас гораздо более детального проектирования. Для данной разработки это особенно актуально, учитывая закладываемые возможности универсального применения с различными датчиками, интерфейсами управления и двигателями. Это накладывает дополнительные аппаратные требования:

- требования к периферии и производительности микроконтроллера, на котором программа должна выполняться;
- требования к постоянному мониторингу состояния всех узлов (поскольку это модульная система, состав платформы может быть изменен в процессе эксплуатации, что не должно вызывать аварийного выхода из строя).

Естественно, это влечет увеличение себестоимости, но надежность и универсальность влекут за собой накладные расходы, с которыми приходится в той или иной степени мириться.

The modular drive control platform is designed to unify the production of motor control electronics. The architecture of the platform implies its application for a wide range of tasks, its main advantage being the possibility to combine different components to select the required characteristics (see Fig. 1).

Many points related to the possibility of expanding the field of application of universal systems are solved by using composite architecture that allows using different physical units to solve specific tasks: feedback modules — to connect rotor position sensors, interface modules — to connect to different data lines to organize control, power modules and power modules of half-bridges are selected for specific types of motors based on power and type. This approach is widely used in the development of electronic products, but on the other hand, a number of tasks are much more effectively solved using a universal module capable of automatically or by manual configuration performing these tasks. In the universal modular platform of electric drive control, the controller module, and, in particular, the software developed for it, performs the functions of such a module. The symbiosis of such approaches makes it possible to maximize the functionality of the platform, ensure reliability, increase efficiency and expand the prospects of its application, whether it is control of high-performance powerful pumps for the oil industry, control of shut-off mechanisms or control of warehouse freight carts, scooters and other mobile means.

The basis of the software is the vector motor control, it is a widely used approach, but in this case you can't put the same algorithm and set of parameters for different motors, because the basic idea is that it is unknown in advance which particular motor will be connected, as well as the mathematical model of this motor is unknown, there is only the type and the main characteristics of the motor, by setting which we should be able to control it. Some parameters are constant for the motor-feedback-sensor linkage, others allow changing the rotation parameters, selecting them we can optimally adjust the operation for a particular task.

However, one should also understand that software is no less complex system component than the hardware component and requires, at times, a much more detailed design. For this development, this is especially true considering the inherent versatility of the system with various sensors, control interfaces and motors. This imposes additional hardware requirements:

- peripheral and performance requirements for the microcontroller on which the program must run;
- requirements for continuous monitoring of the state of all components (since it is a modular system, the platform composition can be changed during operation, which must not cause an emergency failure).

Naturally, this entails an increase in cost, but reliability and versatility entail overheads, which have to be tolerated to some extent.

УДК 004.78 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.167.169

# Автоматизированное рабочее место производителя информационно-управляющих систем

## Automated Workplace of Information and Control Systems Manufacturer

**Якунин А. Н.[1], Косенко В. А.[2], Иванов В. А.[3]**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*[1] yakunin@olvs.miee.ru*
*[2] kosenko@olvs.miee.ru*
*[3] daos@olvs.miee.ru*

**Yakunin A. N.[1], Kosenko V. A.[2], Ivanov V. A.[3]**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*[1] yakunin@olvs.miee.ru*
*[2] kosenko@olvs.miee.ru*
*[3] daos@olvs.miee.ru*

Показываются актуальность и практическая значимость разработки и применения автоматизированного рабочего места сотрудника, обеспечивающего производство произвольных информационно-управляющих систем. Рассматриваются вопросы формализации процесса проектирования автоматизированного рабочего места.
**Ключевые слова:** автоматизированное рабочее место; проектирование; производство; изготовление; оптимизация.

The paper shows the relevance and practical significance of the development and application of an automated workstation of an employee, providing the production of arbitrary information and control systems. The issues of formalizing the design process of the designed workstation have been considered.
**Keywords:** automated workstation; designing; production; optimization.

### *Введение*

Современные производственные и технологические процессы претерпевают качественные изменения, заключающиеся в повышении безотказности, технологичности, удобства и скорости обработки информации. Ключевым элементом в этом процессе является применение автоматизированных рабочих мест (АРМ), представляющих собой комплекс из аппаратных и программных решений, служащих для автоматизации определенной деятельности. Цель данной работы — донести до широкого круга читателей функции, задачи, состав АРМ и показать целесообразность разработки и использования АРМ.

### *Задачи и функции АРМ*

Проектированию и использованию АРМ в последнее время уделяется все более пристальное внимание. Оптимизацию, любого технологического процесса или рутинных операций, совершаемых похожим или идентичным образом, можно

назвать АРМ. При этом в этих операциях, как правило, сокращается участие персонала и, как следствие, уменьшается вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором.

В работе проведены исследования вопросов проектирования АРМ на производственном участке информационно-управляющих систем (ИУС), которые, в отличие от других типов АРМ (например бухгалтерских), позволяют сделать удобными технологические операции по контролю производства электронных систем и их функционирования. Контроль ИУС заключается в формировании на них воздействий тестовых сигналов и выполнении необходимых измерений выходных параметров с последующим анализом полученных результатов.

АРМ, задействованные при производстве ИУС, можно классифицировать с использованием различных определяющих признаков, например по стоимости, степени автоматизации, по наличию арбитражных средств измерения и мер и др.

В соответствии с фундаментальными принципами построения автоматизации рабочих мест [1] АРМ должно быть устойчиво к сбоям, иметь системную взаимосвязь всех компонентов, обладать гибкостью к дальнейшей модификации и быть эффективной.

В общем случае каждое АРМ уникально, но перед его проектированием необходимо составить перечень требований, которые оно должно выполнять. Их количество и состав определяются сформулированными задачами и функциями АРМ. Как правило, к информационно-управляющим системам, которые решают задачи, связанные с необходимостью принятия решения в реальном времени, предъявляются особые требования. Это отражается на требованиях к АРМ, обеспечивающих контроль ИУС на этапе их производства.

***Новизна результатов работы***

В ходе выполнения работ был составлен перечень требований к АРМ, на основании которых была спроектировано и изготовлено АРМ, обеспечивающее автоматизацию контроля ИУС на участке производства. Авторы считают, что в данной работе новыми являются сформулированные принципы построения, а также спроектированное и изготовленное АРМ, используемое на производственном участке.

***Работа выполнена в рамках постановления № 218, 11 очередь, шифр 2019-218-11 по теме «Цифровая модульная платформа управления приводами, двигателями, подвижными узлами и механизмами».***

***Литература***

1. Фундаментальные принципы создания автоматизации мест для работы. [Электронный ресурс]. URL: http://arprime.ru/avtomatizacia/rabocheye-mesto-spetsialista (дата обращения: 03.08.2021).

***Introduction***

Modern production and technological processes are undergoing qualitative changes consisting in increased reliability, manufacturability, convenience and speed of information processing. A key element in this process is using automated workstations (AWS), which are a set of hardware and software solutions used to automate certain activities. The purpose

of this work is to convey to a wide range of readers the functions, tasks, composition of AWS and to show the feasibility of developing and using AWS.

***Tasks and functions of AWS***

The design and use of an automated workstation has recently received increasing attention. Optimization of any technological process or routine operations performed in a similar or identical way can be called an automated workstation. At the same time in these operations, as a rule, the participation of personnel is reduced and, as a consequence, the probability of errors associated with the human factor is reduced.

The paper researches into the issues of designing automated workstations on the production site of information and control systems (ICS), which, unlike other types of workstations (for example, accounting), allow you to make convenient technological operations to control the production of electronic systems and their functioning. Control of ICS consists in forming the test signals impacts on them and making the subsequent measurements of output parameters with the performing of their analysis.

Automated workstations involved in the production of ICS, can be classified using different defining attributes, such as cost, automation level, availability of arbitration means of measurement and measures, etc.

According to the fundamental principles of workstation automation [1], an AWS should be fault tolerant, have a systematic interconnection of all components, be flexible to further modification, and have operational efficiency.

In general, each workstation is unique, but before designing it, it are necessary to make a list of requirements that it must fulfill. Their quantity and composition are determined by the formulated tasks and functions of an automated workstation. As a rule, special requirements are imposed on the information-management systems which solve the tasks connected with the necessity of making decisions in real time. This fact cannot but influence the requirements to automated workstations, providing control of ICS at the stage of their production.

***Novelty of the results***

In the course of the work a list of requirements to automated workstations was compiled, on the basis of which an automated workstation providing for automation of control of IMS on the production site was designed and produced. The authors consider the formulated principles of construction, as well as the designed and manufactured automated workstation used at the production site to be new in this work.

***The work was performed within the framework of the resolution № 218, turn 11, code number 2019-218-11 on "Digital modular platform for control of drives, motors, moving assemblies and mechanisms".***

***References***

1. Fundamental principles of creating workplace automation. [Electronic resource] URL: http://arprime.ru/avtomatizacia/rabocheye-mesto-spetsialista (date of access: 03.08.2021).

УДК 621.375 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.170.171

# Настройка и регулировка усилителя мощности класса Е в системе беспроводной передачи энергии

## Setting and Adjusting the E-class Power Amplifier in the Wireless Power Transmission System

**Гуров К. О., Миндубаев Э. А.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*constantinegurov@yandex.ru*

**Gurov K. O., Mindubayev E. A.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*constantinegurov@yandex.ru*

Рассмотрена система индуктивной беспроводной передачи энергии с усилителем мощности (УМ) класса Е. Демонстрируется и анализируется характеристическая кривая, соответствующая переключению при нулевом напряжении в УМ, при изменении расстояния между передающей и принимающей катушками индуктивности.

**Ключевые слова:** беспроводная передача энергии; усилитель мощности класса Е; проектирование усилителя мощности.

В настоящее время система индуктивной беспроводной передачи энергии (БПЭ) широко применяется в технических устройствах. БПЭ позволяет как повысить удобство зарядки бытовых приборов [1], так и снизить риск получения инфекции от имплантируемых медицинских устройств [2]. В качестве усилителя мощности в БПЭ активно используется класс Е из-за высокого КПД, который в идеале может достигать 100 % [3], простой конструкции, а также отсутствия необходимости в дополнительных реактивных компонентах, что позволяет минимизировать размер устройства [2].

Стоит отметить, что в работе последовательная катушка индуктивности $L_{series}$ в частотном фильтре, которая является частью схемы усилителя мощности класса Е, служила передающей катушкой в системе БПЭ. С помощью шунтирующего $C_{shunt}$ и последовательного $C_{series}$ конденсаторов во всех случаях достигался номинальный режим работы усилителя мощности класса Е. Сопротивление нагрузки $R_l$ усилителя мощности устанавливалось в диапазоне 1–30 Ом, что соответствует в БПЭ осевому смещению между передающей и принимающей катушками 5–27 мм. В данном диапазоне значений были рассчитаны выходная мощность и эффективность, подаваемые на $L_{series}$, а также потери мощности на ключевом транзисторе.

Было обнаружено, что зависимость $C_{shunt}$ и $C_{series}$ для номинальных режимов работы с изменением $R_l$ имеет ярко выраженную область перегиба. Значения $C_{series}$ лежат примерно на одной прямой при изменении $C_{shunt}$ в более чем три раза от области перегиба. Выходная мощность и эффективность системы БПЭ имеют обратную зависимость. В то же время эффективность передачи энергии сохраняется более 90 % до осевого смещения 24 мм. Выходная мощность изменяется от 0,7 до 9 Вт при увеличении осевого расстояния.

***Работа выполнена в рамках государственного задания, соглашение № 075-03-2020-216 от 27.12,2019 г.***

***Литература***

1. Hui S.Y. Planar Wireless Charging Technology for Portable Electronic Products and Qi // Proceedings of the IEEE, 2013. Vol. 101. №6. P. 1290–1301.
2. Bui A.L. and Fonarow G.C. Home monitoring for heart failure management // J. Am. Coll. Cardiol., 2012. Vol. 59. P. 97–104.
3. Narayanamoorthi R., Vimalajuliet A., Bharatiraja et al. Class E Power Amplifier Design and Optimization for the Capacitive Coupled Wireless Power Transfer System in Biomedical Implants // Energies, 2017. Vol. 10. № 1409. P. 1–20.

УДК 621.3.051.025 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.172.173

# Мощностные характеристики адаптивной системы индуктивной передачи энергии с усилителем мощности класса Е

## Power Characteristics of the Adaptive System of Inductive Energy Transmission with an E Class Power Amplifier

**Селютина Е. В., Миндубаев Э. А.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*opplyana@gmail.com*

**Selyutina Ye. V., Mindubayev E. A.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*opplyana@gmail.com*

Рассмотрена система индуктивной передачи энергии с усилителем класса Е. Система способна поддерживать диапазон постоянных выходных мощностей независимо от смещений передающей и принимающей катушек. Исследована зависимость этого диапазона от рабочей частоты и компенсации реактивной мощности в приемнике.

**Ключевые слова:** беспроводная передача энергии; индуктивная связь; усилитель мощности класса Е; имплантируемые медицинские приборы.

Системы индуктивной передачи энергии (ИПЭ) широко используются для питания имплантируемых медицинских приборов (ИМП), таких как, например, аппараты вспомогательного кровообращения, кохлеарные и ретинальные имплантаты [1]. Усилитель мощности (УМ) класса Е в передатчике систем обеспечивает высокую эффективность, которая теоретически может достигать 100 % [2].

Смещения передающей и принимающей катушек ведут к изменению выходной мощности и к уменьшению общей эффективности систем. Для компенсации влияния смещений была разработана адаптивная система ИПЭ. В такой системе проводится динамическая подстройка номиналов конденсаторов нагрузочной цепи УМ класса Е. В результате подстройки возможно рассчитать диапазон выходных мощностей, который будет поддерживаться постоянно независимо от величины смещения. Из этого диапазона выбирается требуемый уровень мощности для питания заданного ИМП.

В работе проводилось численное моделирование систем ИПЭ в программе LTSpice. В ходе моделирования осевое расстояние между катушками изменялось от 5 до 20 мм. Рабочие частоты систем составили 100 кГц, 1 МГц и 10 МГц. В приемнике использовалась как последовательная, так и параллельная компенсация реактивной мощности.

В результате моделирования систем ИПЭ при последовательной и параллельной компенсации в приемнике было установлено, что при увеличении рабочей частоты диапазон постоянных выходных мощностей расширяется. При дальнейшем увеличении частоты подстройка конденсаторов значительно затрудняется. Как правило, общая эффективность систем увеличивается при использовании параллельной компенсации в приемнике или при увеличении рабочей частоты.

***Работа выполнена в рамках государственного задания, соглашение № 075-03-2020-216 от 27.12,2019 г.***

***Литература***

1. Amar A. Ben, Kouki A. B., Cao H. Power approaches for implantable medical devices // Sensors, 2015. Vol. 15. № 11. P. 28889–28914.
2. Sokal N. O. Class E RF Power Amplifiers // Qex. 2001. Vol. 202 (1). P. 9–20.

УДК 537.871.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.174.175

# Определение предельного значения рабочей частоты системы чрескожной индуктивной передачи энергии мощностью 10 Вт

## Determinating Maximum Permittable Operation Frequency for Inductive Transcutaneous Energy Transfer System with 10 W Output Power

**Рябченко Е. В.[1], Дьячкова Е. С.[1], Данилов А. А.[1], к. ф.-м. н.**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*bmsmiet@mail.ru*

**Ryabchenko E. V.[1], Dyachkova E. S.[1], Danilov A. A.[1], Ph.D**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*bmsmiet@mail.ru*

Проведена серия численных расчетов электромагнитных полей, индуцируемых при работе систем индуктивной чрескожной передачи энергии в диапазоне 200–2000 кГц. По результатам моделирования определена предельно допустимая рабочая частота системы чрескожной передачи энергии с выходной мощностью 10 Вт.
**Ключевые слова:** индуктивная чрескожная передача энергии; электромагнитное поле; напряженность электрического поля; удельная поглощенная мощность.

A series of electromagnetic fields modelling has been performed for transcutaneous energy transfer system with operating frequencies 200–2000 kHz. Based on the obtained results, the maximum permitted operating frequency has been determined for transcutaneous energy transfer system with 10 W output power.
**Keywords:** inductive transcutaneous energy transfer; electromagnetic field; electric field strength; specific absorption rate.

Беспроводное питание имплантируемых устройств может быть оптимальным решением проблемы дискомфорта или риска инфицирования при использовании чрескожного провода. Однако использование систем индуктивной чрескожной передачи энергии связано с возникновением нескольких проблем. К ним относятся нагрев тканей в области имплантации, а также негативные эффекты радиочастотного излучения. Последнее может быть измерено с точки зрения удельной поглощенной мощности (УПМ), которая отражает поглощенную энергию единицей массы биологических тканей человека.

В настоящее время существует тенденция усложнения, увеличения функциональности электронных устройств, в том числе имплантируемых медицинских приборов, вследствие чего растет потребляемая ими мощность. Для обеспечения достаточным уровнем выходной мощности необходимо увеличивать рабочую частоту системы индуктивной чрескожной передачи энергии, что, в свою очередь, приводит к увеличению значений УПМ. С другой стороны, максимальное значение

УПМ и напряженности электрического поля в биологических тканях ограничивают такие стандарты, как СанПин, ICNIRP, IEEE.

Была проведена серия расчетов электромагнитных полей и соответствующих им значений удельной поглощенной мощности для определения максимально допустимой рабочей частоты системы индуктивной чрескожной передачи энергии с выходной мощностью 10 Вт. Были исследованы 19 катушечных пар, имеющих рабочие частоты в диапазоне от 200 до 2000 кГц.

***Литература***

1. Кудряшов Ю. Б., Петров Ю. Ф., Рубин А. Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 184 с.
2. Knecht O., Kolar J. Impact of Transcutaneous Energy Transfer on the electric field and specific absorption rate in the human tissue // IECON 2015 — 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015. P. 004977–004983.

Wireless energy transfer for powering implants can be an optimal solution to discomfort and risk of infection problems while using transcutaneous driveline. However, the use of a transcutaneous energy transfer system is fraught with several emerging problems. One of those issues is tissues heating around implantation area and negative effects of radio frequency radiation. The latter can be assessed from the point of view of specific absorption rate (SAR) calculation, which represents the absorbed energy per unit mass of human biological tissues. Due to the increase in the frequency of the wireless power supply system to achieve higher output powers, the value of the SAR also increases. On the other hand, SanPin, ICNIRP and IEEE restrictions limit SAR maximum value. The modelling-assisted calculation of specific absorption rate has been performed to determine the maximum permissible frequency for transcutaneous energy transfer with 10 W output power. Nineteen inductive couplings have been determined with operating frequencies in the range of 200–2000 kHz.

***References***

1. Kudryashov Yu. B. Petrov Yu. F., Rubin A. B. Radiacionnaya biofizika: radiochasotnye y microvolnovye electromagnytnye izlucheniya. — M.: FIZMATLIT, 2008. — 184 p. (In Russian).
2. Knecht O., Kolar J. Impact of Transcutaneous Energy Transfer on the electric field and specific absorption rate in the human tissue // IECON 2015 — 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015. — P. 004977–004983.

УДК 616-77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.176.177

# Разработка катушечной пары для системы чрескожной индуктивной передачи энергии мощностью 10 Вт

## Developing a Coil Pair for a 10 W Percutaneous Inductive Power Transmission System

**Аубакиров Р. Р.[1], Юдаков И. В.[1], Данилов А. А.[1], к. ф.-м. н.**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*aubakirov@bms.zone*

**Aubakirov R. R.[1], Yudakov I. V.[1], Danilov A. A.[1], Ph.D**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*aubakirov@bms.zone*

Выполнено три процедуры геометрической оптимизации систем беспроводной передачи энергии. Представлено три оптимизированные пары катушек индуктивности. Предложены рекомендации по подбору параметров систем беспроводного питания.
**Ключевые слова:** индуктивная передача энергии; имплантируемая медицинская техника; катушки индуктивности; алгоритм оптимизации; геометрическая оптимизация.

The paper considers three procedures for geometric optimization of wireless power transmission systems. Three optimized pairs of inductors have been presented. Besides, recommendations for the selection of parameters for wireless power systems have been given.
**Keywords:** inductive power transmission; implantable medical equipment; inductors; optimization algorithm; geometric optimization.

Беспроводная передача энергии с помощью катушек индуктивности является перспективным способом питания во многих отраслях, в частности в имплантируемой медицинской технике [1]. Кроме преимущества в виде отсутствия проводов, такой метод питания имеет недостатки в виде смещений катушек. Они влияют на стабильность передачи энергии, что является нежелательным при питании имплантируемой медицинской техники. Геометрическая оптимизация катушек является одним из решений такой проблемы [2].

В данной работе был выполнен расчет пар катушек для частот 220, 440 и 880 кГц для насоса вспомогательного кровообращения (выходная мощность 10 Вт, размер принимающей катушки 35 мм, допустимое падение мощности 10 %, боковое смещение до 35 мм, осевое расстояние 20 мм). В результате оптимизации были получены пары катушек с внешней катушкой с размером 48,9, 46,4 и 45,4 мм. С увеличением частоты плотность намотки увеличивалась, а размер передающей катушки и собственные индуктивности уменьшались. Несмотря на очевидное геометрическое преимущество, следует с осторожностью увеличивать рабочую частоту в связи с возникновением скин-эффекта.

***Работа выполнена в рамках государственного задания, соглашение № 075-03-2020-216 от 27.12.2019 г.***

***Литература***

1. Zeng Y., Clerckx B. and Zhang R. Communications and Signals Design for Wireless Power Transmission // IEEE Transactions on Communications, 2017. V. l. 65, № 5. P. 2264–2290.
2. Fadhel B.Y., Ktata S., Sedraoui K., Rahmani S., Al-Haddad K. A Modified Wireless Power Transfer System for Medical Implants // Energies. 2019. V. l.12 (10). P. 1890.

Wireless power transmission using coils is a promising method of power supply in many industries, in particular, implantable medical devices [1]. In addition to the advantage of no wires, this powering method has disadvantages such as coil misalignments. They affect the stability of energy transfer, which is undesirable when powering implantable medical devices. Geometric optimization of coils is one of the solutions to this problem [2].

The research deals with calculation of pairs of coils for frequencies of 220, 440 and 880 kHz for an auxiliary blood circulation pump (output power 10 W, size of the receiving coil 35 mm, allowable power drop 10 %, lateral displacement up to 35 mm, axial distance 20 mm). As a result of optimization, pairs of coils with an external coil have been obtained with dimensions of 48.9, 46.4 and 45.4 mm. With increasing frequency, the density of the winding increased, and the size of the transmitting coil and its self-inductances decreased. Despite the obvious geometric advantage, care should be taken when increasing the operating frequency due to the appearance of the skin effect.

***This work was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement № 075-03-2020-216 from 27.12.2019.***

***References***

1. Zeng Y., Clerckx B. and Zhang R. Communications and Signals Design for Wireless Power Transmission // IEEE Transactions on Communications, 2017. V. 65. № 5. P. 2264–2290.
2. Fadhel B.Y., Ktata S., Sedraoui K., Rahmani S., Al-Haddad K. A Modified Wireless Power Transfer System for Medical Implants // Energies, 2019. V. l.12 (10). P. 1890.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.178.179

# Проблемы управления качеством базовых технологий микроэлектроники, используемых при проектировании и производстве СБИС

## Problems of Quality Management of Basic Microelectronic Technologies Used in the Design and Manufacture of VLSI

**Панасюк В. Н., Королева А. Н., Игнатов П. В., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Panasyuk V. N., Koroleva A. N., Ignatov P. V., Shipitsin D. S., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

Статья посвящена актуальным вопросам управления качеством базовых технологий микроэлектроники. Авторами предложена концепция расширенного рассмотрения базовой технологии, включающей технологический процесс, комплект средств проектирования и формируемую в процессе их применения конфигурацию конструкции СБИС. Рассмотрены основные составляющие системы управления качеством.
**Ключевые слова:** базовая технология; система управления качеством; PDK; СБИС.

The article is devoted to topical issues of quality management of basic technologies of microelectronics. The authors have proposed a concept of an extended consideration of the basic technology, including the technological process, a set of design tools and the configuration of the VLSI design formed in the process of their application. The main components of the quality management system have been considered.
**Keywords:** basic technology; quality management system; PDK; VLSI.

Управление качеством базовых технологий микроэлектроники является комплексной задачей, объектами которой являются не только базовые технологические процессы, но и комплекты средств проектирования (включая правила проектирования и модели библиотечных элементов), а также результаты проектирования и производства конструкции СБИС на их основе. Несмотря на широкое использование отечественных базовых технологий, в отраслевой нормативной базе отсутствуют единые требования к составу и критериям квалификации базовых технологий и опций, позволяющие их ранжировать по степени пригодности для проектирования и производства СБИС. Дополнительными осложняющими факторами являются: несогласованность локальных критериев управления качеством при реализации базовых технологий в цепочках создания ценности, большие объемы данных, генерируемых в этих процессах разными участниками, а также невозможность напрямую использовать зарубежные и международные стандарты.

Вышеизложенные факторы показывают необходимость разработки системы управления качеством базовых технологий, включающую в себя три последовательно реализуемых составляющих: разработка системных процедур по управлению качеством, разработка методов верификации критичных процессов, формирование методов мониторинга и анализа. Системным критерием управления качеством,

независимым от состава участников, является минимизация количества запусков (итераций) конструкции СБИС до соответствия требованиям технического задания.

Первое направление включает в себя создание контролируемых условий посредством внедрения таких процедур как разработка базовых технологий, разработка комплектов средств проектирования для базовых технологий, разработка конструкции СБИС с использованием базовых технологий, порядок квалификации базовых технологий и опций к базовым технологиям, порядок квалификации комплектов средств проектирования для базовых технологий.

Второе направление предусматривает введение новых методов верификации и квалификации базовых технологий и их составляющих, включающих:

- квалификацию базовых технологий и опций для оценки их текущего статуса;
- квалификацию комплектов средств проектирования;
- контроль маршрута проектирования СБИС с использованием базовых технологий;
- результаты физической верификация топологии кристалла СБИС;
- сравнение параметров измеренных образцов СБИС с результатами моделирования.

Третье направление предусматривает проведение системного мониторинга и анализа данных для оценки состояния базовой технологии и результативности ее применения всеми участниками посредством:

- статистического контроля параметров ВАХ тестовых структур для оценки адекватности моделей;
- анализа результатов применения инструментов для проектирования и верификации СБИС, входящих в форму поставки комплектов средств проектирования для базовых технологий;
- анализа количества корректировок конструкции кристалла СБИС и повторных запусков в производство;
- формирования и рассылки целевых отчетов по качеству разработчикам базовых технологий, комплектов средств проектирования, конструкции СБИС.

Для проведения регулярного мониторинга и анализа в целях управления качеством базовых технологий разработана специализированная база данных, позволяющая хранить информацию по идентификационным признакам топологий кристаллов интегральных схем (дизайн-центр, разработчик, имя топологического файла, базовый маршрут, версия КСП, библиотеки моделей) и результатов проектирования и производства с возможностью поиска по любому заданному параметру. Предложенный системный подход позволяет проводить многофакторный анализ между элементами базовых технологий, закладываемых в конфигурацию конструкции кристалла СБИС, и показателями целевой функции качества — количеством итераций конструкции кристалла в производство.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. — Москва, 1999. — Часть 1.
2. Панасюк В. Н., Королева А. Н., Игнатов П. В., Шипицин Д. С. Проблемы и задачи системы управления изменениями базовых технологий микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2020 — № 2. — С. 26–34.

УДК 621.31 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.180.181

# Разработка технологии и конфигурации радиационно стойкой ячейки энергонезависимой памяти SONOS на базе технологии КМОП 180 нм

## Developing SONOS Radiation-resistant Non-volatile Memory Based on 180 nm Technology

**Червонный Д. В., Арилин Р. А., Болычев Д. И.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dchervonnyy@niime.ru*

**Chervonnyy D. V., Arilin R. A., Bolychev D. I.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dchervonnyy@niime.ru*

Представлены результаты разработки энергонезависимой памяти SONOS на базе технологии КМОП 180 нм. Технологический маршрут реализован за счет встраивания блоков операций формирования ONO-структуры в базовую технологию КМОП 180 нм. Представлены результаты исследования изготовленных образцов с ячейками памяти.
**Ключевые слова:** радиационно стойкая энергонезависимая память; SONOS; встроенная память; КМОП.

The paper presents the results of developing SONOS non-volatile memory based on CMOS 180 nm technology. A route compatible with the basic CMOS 180 nm technology has been implemented by embedding the ONO structure formation blocks. The results of manufacturing have been shown.
**Keywords:** radiation-resistant non-volatile memory; SONOS; embedded memory; CMOS.

В настоящее время микросхемы со встроенной памятью типа EEPROM непригодны для применения в сферах космической техники, атомной энергетики, отдельных отраслях промышленности, где требуется повышенная стойкость электроники к радиационным воздействиям [1–3].

Для повышения стойкости необходима микросхема памяти, которая основана на ином физическом принципе, отличающемся от принципа классической памяти «заряда на плавающем затворе». Такой микросхемой может быть энергонезависимая память со структурой элемента хранения логического состояния типа SONOS. Радиационная стойкость в ней обеспечивается за счет хранения заряда на изолированных ловушках различной природы на интерфейсе $SiO_2$–$Si_3N_4$ (рис. 1).

В данной работе представлены результаты разработки и изготовления образцов технологии SONOS на базе отечественного техпроцесса КМОП 180 нм (опция 5В). Новые технологические операции интегрированы в стандартный маршрут КМОП 180 нм. Использованы элементы хранения SONOS с различными толщинами слоев структуры ONO и различной планарной геометрии. Ведется работа по испытанию на радиационную стойкость изготовленных образцов. Полученные

результаты будут сопоставлены с данными испытаний более ранних предварительных исследований SONOS (технологический прототип) [4].

**Рис. 1.** Отличие способа хранения заряда SONOS и EEPROM

В рамках настоящей работы при разработке ячейки памяти был спроектирован тестовый кристалл, имеющий в составе ячейки памяти различные конфигурации (1Т и 2Т). В качестве транзисторов выборки ячейки 2Т использовались МОП-транзисторы, реализующие схему питания 5 В (одна из опций КМОП 180 нм).

В результате разработки демонстрируется выполнение следующих ключевых позиций:

- интеграция структурированных ячеек SONOS в базовый маршрут КМОП с минимальным изменением технологического процесса и влиянием на элементную базу;
- минимизация дополнительных литографий: добавлено три дополнительные фотолитографии (меньше, чем в технологии EEPROM (+8 ф/л));
- уменьшение площади элемента памяти SONOS относительно EEPROM (для технологии 180 нм) примерно в два раза;
- достижение основных параметров элемента хранения: уровни логического нуля и единицы, времена записи/стирания;
- достижение ресурса переключений в условиях стабильных характеристик в пределах до $2 \cdot 10^4$ циклов;
- разработка программы исследований на радиационную стойкость ячеек памяти SONOS.

***Работа выполнена при поддержке ФПИ (проект № 7-208-2020-2024) «Радиационно стойкая энергонезависимая память»***

***Литература***

1. Темирбулатов М. С., Эннс В. И. Космическая программа и радиационная стойкость современных интегральных микросхем // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2. — С. 76–88.
2. Красников Г. Я., Мещанов В. Д. Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4–64 Мбит для космических применений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2. — С. 4–10.
3. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Игнатов П. В., Мизгинов Д. С. Анализ моделей пробоя подзатворного диэлектрика // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 2. — С. 5–7.
4. Червонный Д. В., Арилин Р. А., Матвеев Н. Н. и др. // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 228–229.

УДК 546.282 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.182.184

# Оптимизация запоминающих свойств от состава мемристора на основе $SiO_x$, полученного плазмохимическим осаждением

## Optimization of Memory Properties from the Composition of $SiO_x$-based Memristor Obtained by Plasma-chemical Deposition

**Гисматулин А. А.[1], д. ф.-м. н., Гриценко В. А.[1,2,3], к. ф.-м. н., Камаев Г. Н.[1]**
*[1] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*
*aagismatulin@isp.nsc.ru*
*[2] Новосибирский государственный университет*
*630090, г. Новосибирск ул. Пирогова, 2*
*[3] Новосибирский государственный технический университет*
*630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20*

**Gismatulin A. A.[1], Sc.D, Gritsenko V. A.[1,2,3], Ph.D, Kamaev G. N.[1]**
*[1] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*
*aagismatulin@isp.nsc.ru*
*[2] Novosibirsk State University*
*2 Pirogov St., Novosibirsk, 630090*
*[3] Novosibirsk State Technical University*
*20 K. Marks Ave., Novosibirsk, 630073, Russia*

Исследованы запоминающие свойства мемристоров на основе $SiO_x$, полученных плазмохимическим осаждением. Установлено, что пленки $SiO_x$ нестехиометрического состава проявляют резистивные переключения при $x = 0{,}7–1{,}8$. Оптимальными запоминающими свойствами обладает мемристор на основе $SiO_{1.1}$.
**Ключевые слова:** мемристор; циклирование; хранение заряда; HRS; LRS.

The paper considers the memory properties of $SiO_x$-based memristors obtained by plasma-chemical deposition. It was found that nonstoichiometric composition $SiO_x$ films exhibit resistive switching at value $x = 0.7–1.8$. The $SiO_{1.1}$-based memristor has optimal memory properties.
**Keywords:** memristor; endurance; retention; HRS; LRS.

В последнее время разработчики мемристоров обратили свое внимание на нестехиометрические пленки. Это связано с тем, что при определенном составе нестехиометрического слоя в мемристоре возможно исключение процедуры формовки [1]. Поэтому разработка практичного мемристорного КМОП-устройства — очень привлекательная перспектива для интеграции с современными кремниевыми технологиями. В статьях, как правило, сообщается только о мемристорных свойствах на основе $SiO_x$ определенного состава [2] или не указывается точный состав полученной пленки [3]. Целью нашей работы было определение химического состава пленки плазмохимического $SiO_x$, проявляющей резистивные переключения, и пленки с наилучшими запоминающими свойствами мемристора.

Пленки $SiO_x$ различного состава получены методом плазмостимулированного химического осаждения из газовой смеси $SiH_4$ — $O_2$ при контролируемом потоке газов путем изменения расхода $O_2$ в диапазоне от 1 до 10 см$^3$/мин. Поток моносилана был постоянным и составлял 10 см$^3$/мин. Во время роста пленки ВЧ-мощность и температура подложки поддерживались на уровне 50 Вт и 200 °С соответственно. Всего для отработки режимов контроля за стехиометрическим параметром $x$ были выращены шесть образцов. Пленки осаждались на сильнолегированную подложку р-типа. Для изучения запоминающих свойств полученных $SiO_x$-пленок были изготовлены МОП-структуры с никелевыми контактами.

Для сравнения запоминающих свойств мемристоров на основе $SiO_x$ разного состава были измерены ВАХ для первых циклов переключений. Нестехиометрические пленки $SiO_x$ проявляют мемристорные свойства в диапазоне $x$ = 0,7–1,8. Наилучшие окна памяти получаются в нестехиометрических пленках $SiO_x$ состава $x$ = 1,1.

Измерения хранения заряда при 85 °С в высокоомном состоянии (ВОС) и низкоомном состоянии (НОС) были выполнены для четырех составов: $SiO_{0.7}$, $SiO_{1.1}$, $SiO_{1.2}$ и $SiO_{1.8}$ (рис. 1). По наклону кривой хранения заряда они были продлены до десяти лет. Мемристоры $SiO_{1.1}$, $SiO_{1.2}$ и $SiO_{1.8}$ могут удерживать окно памяти к десяти годам с величиной окна памяти не менее одного порядка.

Измерения циклов записи/стирания также проводились для четырех составов: $SiO_{0.7}$, $SiO_{1.1}$, $SiO_{1.2}$ и $SiO_{1.8}$ (рис. 1). Но мемристор на основе $SiO_{1.2}$ не имел окна памяти в импульсном режиме. Сопротивление мемристора на основе $SiO_{0.7}$ после примерно $10^2$ числа циклов начало дрейфовать. Мемристор на основе $SiO_{1.8}$ имел окно памяти около одного порядка в импульсном режиме, но после $10^2$ числа импульсов окно памяти схлопывалось. Мемристор на основе $SiO_{1.1}$ держал как минимум $10^4$ циклов записи/стирания. Таким образом, наилучшими запоминающими свойствами обладает мемристор на основе пленки нестехиометрического $SiO_x$-состава $x$ = 1,1.

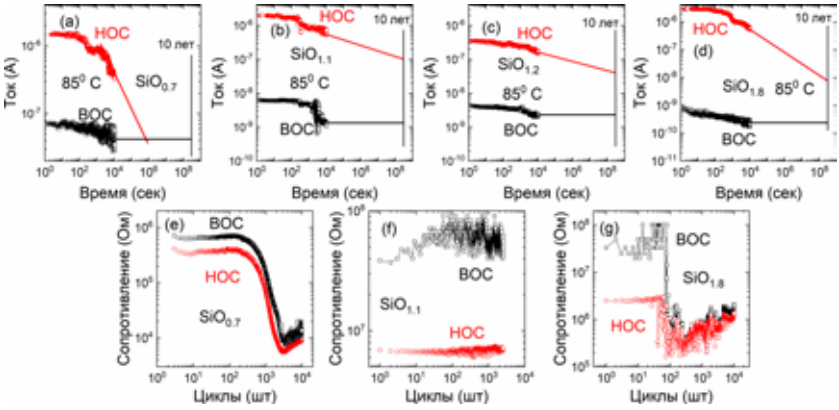



**Рис. 1.** Измерения хранения заряда для различных составов $SiO_x$: (a) $SiO_{0.7}$, (b) $SiO_{1.1}$, (c) $SiO_{1.2}$ и (d) $SiO_{1.8}$. Измерения циклов записи/стирания для различных составов $SiO_x$: (e) $SiO_{0.7}$, (f) $SiO_{1.1}$ и (g) $SiO_{1.8}$

***Литература***

1. Гриценко В. А., Алиев В. С., Исламов Д. Р., Воронковский В. А. Способ изготовления активного слоя для универсальной памяти на основе резистивного эффекта / Патент на изобретение Российской Федерации, № RU2611580, 2017.
2. Mehonic A., Munde M. S., Ng W. H., Buckwell M., Montesi L., Bosman M., Shluger A. L., Kenyon A. J. Intrinsic resistance switching in amorphous silicon oxide for high performance SiOx ReRAM devices // Microelectronic Engineering, 2017. V. 178. P. 98–103.
3. Mikhaylov A. N., Belov A. I., Guseinov D. V., Korolev D. S., Antonov I. N., Efimovykh D. V., Tikhov S. V., Kasatkin A. P., Gorshkov O. N., Tetelbaum D. I., Bobrov A. I., Malekhonova N. V., Pavlov D. A., Gryaznov E. G., Yatmanov A. P. Bipolar resistive switching and charge transport in silicon oxide memristor // Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials. 2015. V. 194. P. 48–54.

Recently, the memristor developers have turned attention to non-stoichiometric films. This is due to the fact that with a certain composition of the non-stoichiometric layer in the memristor, it is possible to exclude the forming procedure [1]. Therefore, the practical CMOS memristor device development is a very attractive prospect for integration with modern silicon technologies. The papers, usually, only report on memristor properties based on certain composition of $SiO_x$ [2] or do not indicate the exact resulting film composition [3]. The aim of our work was to determine the chemical composition of the plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) $SiO_x$ film exhibiting resistive switching, as well as the film composition with the best memristor memory properties. The $SiO_x$ films of various compositions were obtained by PECVD from a $SiH_4$ — $O_2$ gas mixture at a controlled gas flow by varying the $O_2$ flow rate in the range from 1 to 10 $cm^3$/min. The monosilane flow was constant and amounted to 10 $cm^3$/min. During film growth, the RF power and substrate temperature were maintained at 50 W and 200 °C, respectively. In total, 6 samples were grown to test the control modes for the stoichiometric parameter x. The films were deposited on a heavily doped p-type substrate. To study the memorable properties of the obtained $SiO_x$ films, MOS structures with nickel contacts were fabricated. To compare the memory properties of $SiO_x$-based memristors of different compositions, the $I$ — $V$ characteristics were measured for the first switching cycles. Nonstoichiometric $SiO_x$ films exhibit memristor properties in the range $x = 0.7–1.8$. The best memory windows are obtained in nonstoichiometric $SiO_x$ films with the composition $x = 1.1$. Retention measurements at 85 °C in the high-resistance state (HRS) and low-resistance state (LRS) were performed for four compositions: $SiO_{0.7}$, $SiO_{1.1}$, $SiO_{1.2}$ and $SiO_{1.8}$ (Fig. 1). The retention slope was extended to 10 years. Memristors $SiO_{1.1}$, $SiO_{1.2}$, and $SiO_{1.8}$ can hold a memory window up to 10 years with a memory window size of at least 1 order of magnitude. Endurance measurements were also carried out for four compositions: $SiO_{0.7}$, $SiO_{1.1}$, $SiO_{1.2}$, and $SiO_{1.8}$ (Fig. 1). But the memristor based on $SiO_{1.2}$ did not have a memory window in the pulsed mode. The resistance of the $SiO_{0.7}$-based memristor began to drift after about $10^2$ cycles. The memristor based on $SiO_{1.8}$ has a memory window of about 1 order in the pulsed mode, but after $10^2$ numbers of pulses, the memory window collapsed. The $SiO_{1.1}$-based memristor holds at least $10^4$ write/erase cycles. Thus, a memristor based on a nonstoichiometric $SiO_x$ film with composition $x = 1.1$ has the best memory properties.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.185.186

# Приборы и технологии ScientaOmicron для создания наномасштабных структур с заданными физическими свойствами и построения прототипа квантового компьютера

## ScientaOmicron Instruments and Technologies Used to Create the Nano-scale Structures with Specified Physical Properties and Developing a Quantum Computer Prototype

**Шафоростов А. А., к. т. н., Трусов М. А., к. ф.-м. н.**
*ООО «Группа Ай-Эм-Си»*
*117638, г. Москва, ул. Криворожская, 23, корп. 3*

**Shaforostov A. A., Ph.D, Trusov M. A., Ph.D**
*IMC Group Ltd*
*23/3 Krivorozhskaya St., Moscow, 117638*

В докладе представлены новые разработки концерна ScientaOmicron для создания наномасштабных структур заданной геометрии с заданными физическими свойствами методами молекулярно-лучевой эпитаксии, атомно-слоевого осаждения, нанолитографии и смежными технологиями в условиях сверхвысокого вакуума, в том числе применительно к построению прототипа квантового компьютера.
**Ключевые слова:** ScientaOmicron; MIP; MBE; ALD; Quantum Computing.

Компания ScientaOmicron — мировой лидер в области разработки технологий исследования и модификации свойств поверхности в сверхвысоком вакууме. Благодаря обладанию фундаментальными технологиями и богатейшим опытом в области сканирующей зондовой микроскопии, электронной спектроскопии, молекулярно-лучевой эпитаксии и в других смежных направлениях компания предоставляет своим клиентам лучшее оборудование для исследования поверхности из доступного на мировом рынке. В настоящем докладе мы рассмотрим новейшие методики и последние разработки ScientaOmicron для создания наномасштабных структур заданной геометрии с заданными физическими свойствами методами молекулярно-лучевой эпитаксии, атомно-слоевого осаждения, нанолитографии, а также смежными технологиями в условиях сверхвысокого вакуума, в том числе применительно к построению работающих квантовых вычислительных схем.

Направление молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE) успешно развивается в компании ScientaOmicron уже более 20 лет. С недавних пор, объединив в рамках одной системы технологии MBE, атомно-слоевого осаждения, осаждения из газовой фазы, лазерного осаждения, магнетронного напыления, различные средства литографии и анализа поверхности, компания продвигает комплексное решение MIP (Materials Innovation Platform) для создания разнообразных структур заданной геометрии с заданными физическими свойствами в сверхвысоком вакууме и контроля их физических свойств. Решения MIP уже успешно применяются в ряде крупнейших исследовательских физических центров для создания элементов квантового компьютера и построения прототипа работающего вычислительного устройства.

Компания ScientaOmicron гордится своим сотрудничеством с Институтом квантовых вычислений Университета Ватерлоо (Канада), с Центром квантовых вычислений и коммуникаций Университета Нового Южного Уэльса (Австралия) и другими ведущими научными организациями, занимающимися данной проблематикой. Решения MIP успешно работают и позволяют получать самые передовые результаты, в том числе благодаря тесному контакту ученых-исследователей со специалистами компании, что дает возможность непрерывно модернизировать аппаратную и программную часть комплекса MIP сообразно вновь возникающим задачам и планируемым экспериментам.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.187.189

# Особенности перехода к фотолитографии уровня 28 нм

## Some Features of a Transition to 28 nm Node Photolithography

**Шипицин Д. С., к. ф.-м. н., Панкратов А. Л., Балан Н. Н., к. т. н., Иванов В. В., Кузовков А. В.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dshipitsin@niime.ru*

**Shipitsyn D. S., Ph.D, Pankratov A. L., Balan N. N., Ph.D, Ivanov V. V., Kuzovkov A. V.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dshipitsin@niime.ru*

Описаны основные задачи вычислительной литографии в свете перехода к технологии проектных норм 28 нм. Рассматриваются отличительные особенности процессов SMO, OPC и расстановки SRAF в сравнении с технологией проектных норм 90 нм.
**Ключевые слова:** проекционная фотолитография; SRAF; OPC; SMO.

The paper describes the features of transition to 28 nm-node technology on the issue of computational lithography. Some distinctive features of source optimization, optical proximity correction and SRAF generation have been considered in comparison with 90-nm node mastered by domestic industry.
**Keywords:** photolithography; SRAF; OPC; SMO.

Разработка технологии 28 нм на отечественных производственных мощностях подразумевает значительные изменения в подходе к литографии. Для выделения главных отличий рассмотрим, как сегодня реализованы литографические процессы в самой современной из имеющихся на сегодняшний день в России технологий — уровня 90 нм (ознаменовавшей в свое время значительный прогресс российской электронной отрасли в сравнении с началом 2000-х годов [1]) и что меняется на уровне 28 нм.

Критические слои в технологии 90 нм формируются с помощью установок фотолитографии без иммерсии, имеющих длину волны 193 нм и максимальную числовую апертуру от 0,75 до 0,85. Источник освещения в таких системах доступен в трех геометрических формах: стандартный, аннулярный (кольцевой) и квадрупольный. Типовая серия установок для технологий данного уровня — ASML PAS5500. В литографии используются позитивные химическиусиленные фоторезисты, а также вспомогательные антиотражающие подслои. При генерации топологии ФШ применяются процедуры коррекции эффектов оптической близости на основе моделирования (МВОРС — Model Based Optical Proximity Correction) и расстановки непропечатываемых вспомогательных элементов (SRAF — Sub-Resolution Assist Features). Кроме того, по завершении проектирования фотошаблонов производится проверка на наличие потенциальных дефектов средствами моделирования литографии.

Технология проектных норм 28 нм требует как более современного оборудования, так и новых вычислительных процедур. Здесь используются иммерсионные установки, позволяющие увеличить значение числовой аперуры проекционного объектива до 1,35. Кроме того, важнейшим отличием этих литографических систем является использование осветителя произвольной формы, реализуемого при помощи перестраиваемого ДОЭ на основе матрицы МЭМС-зеркал (технология Flexray [2]). Применение таких осветителей позволяет оптимизировать дифракционную картину практически для любой геометрии фотошаблона (SMO — Source-Mask Optimization).

Техника SMO представляет собой совместную с топологической коррекцией оптимизацию геометрии источника. Основная трудность метода заключается в определении набора топологических структур, для которых будет настраиваться источник. Поскольку топология изделия может содержать множество структур с различным характером периодичности, реализация SMO предполагает проведение ряда весьма ресурсоемких вычислительных экспериментов.

Среди прочих вычислительных процедур в технологии 28 нм также используются MBOPC и расстановка SRAF. В данном случае математический аппарат более сложен, однако с точки зрения технологии изменяется лишь объем измерений, требуемых для подготовки процедур, и объем вычислительных ресурсов, требуемых для их выполнения. Кроме того, в дополнение к OPC используется техника локального улучшения пропечатываемости: по результатам верификации фотошаблона средствами моделирования опасные участки дополнительно корректируются методом обратной литографии (ILT — Inverse Lithography Technique [3]).

Переход к проектным нормам 28 нм требует новых оборудования и материалов, а также влечет существенные изменения в используемых вычислительных процедурах. Тем не менее последние достижения открывают перспективу для снижения вычислительной емкости методик повышения разрешающей способности проекционной фотолитографии.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
2. Bekaert J., Van Look L. et al. Scanner matching for standard and freeform illumination shapes using FlexRay // Proc. SPIE 7973, Optical Microlithography XXIV, 79731I, 2011. V. l. 7973.
3. Yenikaya B. Full chip hierarchical inverse lithography: a solution with perfect symmetry // Proc. SPIE 10147, Optical Microlithography XXX, 101470L, 2017. V. l. 10147.

The development of 28 nm node technology at domestic facilities implies significant changes in photolithography. To highlight the main differences, let's consider how lithographic processes are implemented in the most modern technology available in Russia today — the 90 nm node (which some time ago marked the significant progress of the Russian electronics industry in comparison with the early 2000s [1]). And then we are going to consider the main changes in 28 nm node technology.

Critical layers in 90 nm technology are formed using dry photolithography tools with a wavelength of 193 nm and a maximum numerical aperture of 0.75 to 0.85. The light source in such systems is available in three geometric shapes: conventional, annular and quasar. A typical tool for this node is ASML PAS5500. Positive chemically-enhanced photoresists are typically used with BARC layers. When generating the photomask topology, MBOPC and SRAF placement are applied. In addition, after the design of the photomasks is completed, a check for potential defects is made by means of lithography modeling.

The 28 nm node technology requires both more advanced tools and new computational procedures. As for lithography process, it uses immersion tools to increase the NA value to 1.35. In addition, the most important difference between these lithographic systems is the use of an arbitrary-shaped illuminator realized with a tunable DOE based on a MEMS mirror array (Flexray technology [2]). The use of such illuminators allows you to optimize the diffraction pattern for wide range of design topologies (it calls SMO or Source-Mask Optimization).

The SMO technique is a source geometry optimization combined with topology correction. The main difficulty of the method lies in determining the set of topological structures for which the source will be configured. Since the topology of a product can contain many structures with different variants of periodicity, the implementation of SMO involves a number of very resource-intensive computational experiments.

28 nm node technology also uses MBOPC and SRAF. In this case, the mathematical apparatus is more complicated, but actually the main difference here is the increased amount of measurements and much larger volume of calculations. As for OPC upgrade, the technique of local printability improvement is used — according to the results of verification, hazardous areas are additionally corrected by ILT (ILT — Inverse Lithography Technique [3]).

The transition to 28 nm node requires new equipment and materials, and also entails significant changes in computational procedures. Nevertheless, recent advances open the prospect for reducing the computational capacity of RET.

***References***

1. Krasnikov G. Ya. Vozrozhdenie naukoemkikh otraslei promyshlennosti: real'nost' ili fantazii? // Puti stabilizatsii ehkonomiki Rossii. Moskva, 1999. P. 162–174.
2. Bekaert J., Van Look L. et al. Scanner matching for standard and freeform illumination shapes using FlexRay // Proc. SPIE 7973, Optical Microlithography XXIV, 79731I, 2011. V. l. 7973.
3. Yenikaya B. Full chip hierarchical inverse lithography: a solution with perfect symmetry // Proc. SPIE 10147, Optical Microlithography XXX, 101470L, 2017. V. l. 10147.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.190.191

# Конструктивно-технологические особенности проектирования аналого-цифровых схем с проектными нормами 28 нм

## Design and Technological Features of Creating a Mixed-signal Circuits with Design Standards of 28 nm

**Горшкова Н. М.**
*АО «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд № 4922, 4, стр. 2*
*ngorshkova@elvees.com*

**Gorshkova N. M.**
*R&D Center "ELVEES", JSC*
*bld. 2, 4 Lane 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*ngorshkova@elvees.com*

Рассмотрены конструктивно-технологические особенности проектирования аналого-цифровых схем, выполненных по КМОП-технологии 28 нм, повышающие выход годных. Предложен метод, повышающий согласование активных и пассивных приборов. Приведены конструктивные решения для предотвращения тиристорного эффекта в потенциально опасных местах.
**Ключевые слова:** проектная норма; топология; КМОП-структура; аналого-цифровой блок.

The paper considers design and technological features of designing mixed-signal circuits, made by CMOS technology 28 nm, increasing the yield. A method has been proposed for increasing the matching of active and passive devices. Constructive solutions for preventing the thyristor effect in potentially dangerous places have been presented.
**Keywords:** design rule; topology; CMOS structure; mixed-signal circuit.

В России существует потребность в создании отечественных сложных функциональных блоков (СФ-блоков) для замены импортных аналогов, которые ничем бы не уступали им по характеристикам. Добиться высоких показателей по характеристикам СФ-блоков возможно в случае использования минимальных технологических проектных норм, оригинальных схемотехнических решений, а также топологий, которые бы максимально близко воспроизводили параметры, заложенные в схемотехнические решения.

В аналоговом блоке высокое согласование приборов друг с другом обеспечивает максимальное совпадение электрических характеристик при моделировании оригинальной схемы со схемой, восстановленной из топологии, а также повышает выход годных продукции. Возникает необходимость на этапе разработки электрической схемы учитывать влияние взаимного расположения областей одного и того же прибора, а также соседних структур. Для согласования активных приборов необходимо выбирать оптимальное расстояние между поликремниевыми затворами, располагать сток/истоковые области в определенной последовательности в рамках одного прибора. В противном случае это приводит к разбалансировке параметров из-за различного механического напряжения, вызванного разницей в длине

активной области. Согласование для пассивных приборов достигается за счет особой конфигурации и соотношения геометрических размеров сторон приборов. Для снижения вероятности появления паразитной связи между отдельными приборами необходимо использовать дополнительные средства защиты в виде областей с повышенным сопротивлением [1].

Отличительной особенностью данной технологии является однонаправленное расположение поликремния на кристалле. Это накладывает определенные требования на проектирование топологии отдельных блоков, окружающей цифровой логики и блоков памяти.

Разработана и реализована топология серии СФ-блоков (АЦП, ЦАП, блоков сериализации-десериализации данных) в составе кристалла по технологии КМОП 28 нм. Данный опыт, несомненно, позволит проектировать в дальнейшем микросхемы различного назначения, в том числе скоростные волоконные системы передачи данных и другие изделия, позволяющие заменить иностранные аналоги на отечественном рынке.

***Литература***

1. Helmy A., Ismail M. A Design Guide for Reducing Substrate Noise Coupling in RF Applications // IEEE Circuits&Devices Magazine, September/October 2006. P. 7–21.

УДК621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.192.194

# Оценка надежности суб-100-нм КМОП ИС с использованием ускоренных испытаний тестовых структур

## Assessing Sub-100 nm CMOS ICs Reliability Using Accelerated Measurement Test Structure

**Сивченко А. С.**
*НПК «Технологический центр»*
*124498 г. Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7*
*asivchenko@yandex.ru*

**Sivchenko A. S.**
*"Technological Centre" SMC*
*bld. 7, 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498*
*asivchenko@yandex.ru*

Разработаны тестовые структуры, методики и автоматизированные программы ускоренных измерений, позволяющие проводить оценку надежности суб-100-нм КМОП ИС. Представлены результаты исследования основных механизмов физических отказов КМОП-технологии с проектными нормами 65 нм.
**Ключевые слова:** надежность; МОП-транзистор; тестовые структуры; отказ; металлизация ИС; горячие носители; дефектность.

The paper presents test structures, techniques and automated programs for accelerated measurements developed to assess the reliability of sub-100-nm CMOS ICs. In addition, it presents the results of the study of the main mechanisms of physical failures of CMOS technology with design standards of 65 nm.
**Keywords:** reliability; MOS transistor; test structures; fault; IC metallization; hot carriers; defectiveness.

В настоящее время для разработки радиоэлектронной аппаратуры специального назначения требуются интегральные схемы (ИС) с высоким уровнем производительности и надежности. Основной тенденцией повышения производительности ИС является увеличение степени их интеграции за счет уменьшения проектных норм, однако вместе с этим вопросы качества и надежности ИС становятся все более актуальными.

Уменьшение топологических размеров элементов происходит за счет применения новых материалов и технологий и при достижении ИС суб-100-нм размеров приводит к возникновению новых физических механизмов отказов: пробою подзатворного диэлектрика, электромиграции проводящих шин и переходных окон, деградации параметров транзисторов под действием горячих носителей и высокой температуры. С каждым последующим поколением ИС ценность информации о качестве технологического процесса их изготовления возрастает. Это связано с увеличением влияния вариации параметров технологических процессов и чистоты используемых материалов на возникновение дефектов, которые вызывают физические механизмы отказов.

Получая ИС, изготовленные на сторонних фабриках, дизайн-центры проводят контроль их надежности на основе методов длительных испытаний ИС.

При этом оценка качества технологического процесса изготовления ИС, как правило, ими не проводится. Однако это может стать критичным для доверенных ИС специального назначения и космического применения, где предъявляются повышенные требования к уровням надежности и радиационной стойкости, так как некоторые виды скрытых дефектов, сокращающие период нормальной работы ИС, могут быть определены только по результатам технологического контроля. Осуществлять такой контроль нами предлагается с помощью ускоренных испытаний специализированных технологических тестовых структур. Данные структуры размещаются в специальном тестовом кристалле, который повторяется с заданным шагом по всей полупроводниковой пластине совместно с исследуемыми ИС. В дальнейшем все испытания тестового кристалла проводятся в составе пластины автоматизированными программами ускоренных измерений по разработанным методикам контроля.

Так, на рис. 1 представлены полученные зависимости КВГ ИС от суммарной площади подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов ввода-вывода, построенные на основе измеренной дефектности КМОП-технологии с проектными нормами 65 нм.

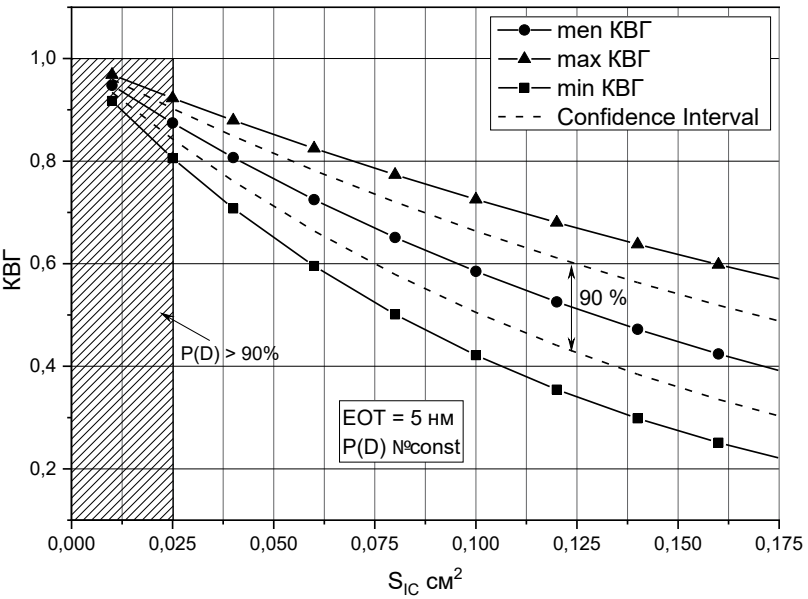



**Рис. 1.** Зависимости КВГ от суммарной площади подзатворного диэлектрика в ИС ($S_{IC}$), рассчитанные по измеренной дефектности

На основе измеренной дефектности показано, что возможно получить 95% КВГ по исследуемому диэлектрику для ИС с ≈17 млн транзисторами, при этом их расчетное время наработки до отказа — 100 000 ч для 90% образцов из выборки

с доверительной вероятностью $P(TTF_{0,1}) = 0,9$, будет гарантировано при напряжении $(1,42^{+0,024}_{-0,024}) \cdot Vdd$. В результате измерений установлено, что технологический запас надежности подзатворного диэлектрика в 100 000 ч при параметрах $V_{dd} + 10\%$ и 125 °C обеспечен полупроводниковой фабрикой для исследуемых диэлектриков.

Таким образом, представленный в данной работе метод оценки надежности ИС на основе анализа качества технологии их изготовления является весьма актуальным, особенно для ИС, изготовленных на зарубежных полупроводниковых фабриках. Использование данного метода позволяет увеличить достоверность проводимой оценки надежности ИС, проследить стабильность технологии их изготовления от партии к партии и снизить риски поставки ИС с несанкционированными изменениями в технологии их изготовления, снижающими надежность, а также способствует уменьшению стоимости проведения испытаний при анализе надежности группы ИС, изготовленных при MPW-запуске.

***Литература***

1. Jedec Standard JP001-1A. Foundry process qualification guidelines — Backend of line testing, 2018. September.
2. Jedec Standard JP001-2A. Foundry process qualification guidelines — Front end transistor level, 2018. September.
3. Sivchenko A. S. Determination of the Operating Time to Failure of a Sub-100-nm MOS Transistor Gate Dielectric Using Accelerated Tests / A. S. Sivchenko, E. V. Kuznetsov, A. N. Saurov // Russian Microelectronics, 2020. Vol. 49. № 7. P. 479–484.

УДК 538.911 + 621.793.1 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.195.196

# III-N-гетероструктуры для СВЧ- и силовой электроники, выращенные на отечественной установке МОС-гидридной эпитаксии Dragon-125

## III-N Heterostructures for Microwave and Power Electronics Grown on the Domestic Dragon-125 MOCVD System

**Цацульников А. Ф.[1], д. ф.-м. н., Лундин В. В.[2], к. ф.-м. н., Заварин Е. Е.[2], к. ф.-м. н., Сахаров А. В.[1,2], к. ф.-м. н., Николаев А. Е.[1,2]**
*[1] НТЦ микроэлектроники РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26*
*andrew@beam.ioffe.ru*
*[2] ФТИ им. А. Ф. Иоффе*
*194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26*

**Tsatsulnikov A. F.[1], Sc.D, Lundin W. V.[2], Ph.D, Zavarin E. E.[2], Ph.D, Sakharov A. V.[1,2], Ph.D, Nikolaev A. E.[1,2]**
*[1] Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS*
*andrew@beam.ioffe.ru*
*26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021*
*[2] Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia*

С использованием отечественной установки МОС-гидридной эпитаксии Dragon-125 разработана технология выращивания HEMT-структур на основе AlGaN и InAlN с намеренно легированными изолирующими буферными слоями и *in-situ* $Si_3N_4$-покрытиями. Изготовлены HEMT-транзисторы и измерены их параметры.
**Ключевые слова:** МОС-гидридная эпитаксия; нитрид галлия; транзистор; HEMT; SiC; Si.

The paper highlights HEMT structures based on AlGaN and InAlN with initially doped insulating buffer layers and *in-situ* $Si_3N_4$ passivation that are developed using the Russian MOVPE system Dragon 125. HEMT transistors have been manufactured and their parameters measured.
**Keywords:** MOVPE; gallium nitride; transistor; HEMT; SiC; Si.

Для изготовления III-N-гетероструктур для СВЧ- и силовой электроники современная МОС-гидридная установка должна обеспечивать необходимый комплекс технологических возможностей, включая рост гетероструктур на основе AlGaN и InAlN, намеренное легирование буферного слоя, нанесение пассивирующего $Si_3N_4$-покрытия. В работе приведены результаты разработки III-N-технологии с учетом указанных выше требований на российской установке МОС-гидридной эпитаксии Dragon-125.

Впервые разработана технология совместного легирования буферных слоев углеродом и железом. Для GaN/AlN/AlGaN-гетероструктур с легированным буферным слоем на подложках SiC была получена подвижность >2000 $см^2/В{\cdot}с$ при концентрации в канале $>1{,}2 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$. В АО «Светлана-Электронприбор», АО «НПФ «Микран», НИУ

«МИЭТ» в транзисторах, изготовленных из таких структур, на частотах в диапазоне 2,4–3 ГГц была реализована удельная выходная мощность 3–5 Вт/мм и КПД >35 % [1]. В АО НПП «Салют» была достигнута граничная частота ft — 73 ГГц.

Разработана технология роста HEMT-гетероструктур на основе InAlN с удельным сопротивлением <210 Ом/□. В АО «НПФ «Микран» изготовлены транзисторы с максимальной плотностью тока насыщения 1,27 А/мм и крутизной 450 мС/мм, имеющие на частоте до 40 ГГц удельную выходную мощность до 4,5 Вт/мм [1].

Разработана технология изготовления HEMT с селективновыращенными омическими контактами и созданы транзисторы с удельной выходной мощностью 3,25 Вт/мм и КПД 47 % на частоте 3 ГГц [2].

***Литература***

1. Великовский Л. Э. и др. Разработки и исследования СВЧ транзисторов на основе AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур // Сборник трудов 10-й Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». — С. 33–36.
2. Rogachev I. A. et al. A fabrication of AlGaN / AlN / GaN HEMT without annealing of ohmic contacts // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2019. V. 1326. P. 012002.

Modern MOVPE system for growth of III-N heterostructures for microwave and power electronics should provide certain technological possibilities, including growth of a AlGaN and InAlN based heterostructures, initial doping of buffer layer, $Si_3N_4$ passivation. The paper presents the results of developing the III-N technology, taking into account the above requirements and using Dragon-125 MOVPE system developed in Russia.

The technology of joint doping of buffer layers with carbon and iron was developed for the first time. Mobility >2000 $cm^2/V{\cdot}s$ at carrier concentration of $> 1.2 \cdot 10^{13}$ $cm^{-2}$ was achieved for GaN/AlN/AlGaN heterostructures with a doped buffer layer on SiC substrates. Specific output power of 3–5 W/mm and efficiency >35 % at frequencies in the 2.4–3 GHz range were achieved on the transistors that are fabricated at Svetlana-Electronpribor JSC, Mikran JSC, MIET [1]. HEMTs with cutoff frequency of 73 GHz were fabricated at “SPE “Salyut” JSC.

Technology of the growth of InAlN-based HEMT structures with resistivity <210 Ohm/□ was developed. HEMTs with maximum current density of 1,27 A/mm, transconductance of 450 mS/mm and specific output power up to 4,5 W/mm at frequency up to 40 GHz were fabricated at Mikran JSC [1].

Technology of HEMTs with selectively grown ohmic contacts was developed and transistors with specific output power of 3.25 W/mm and efficiency of 47 % at frequency of 3 GHz were fabricated [2].

***References***

1. Velikovskii L. E. et al. Development and research of microwave transistors based on AlGaN/GaN and InAlN/GaN heterostructures // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructure Microwave Electronics “Mokerovskie chtenia”. P. 33–36.
2. Rogachev I. A. et al. A fabrication of AlGaN / AlN / GaN HEMT without annealing of ohmic contacts // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2019 — V. 1326. P. 012002.

УДК 53.087.04 + 621.793.1 + 546.1/681 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.197.200

# Использование сверхвысокоомных эпитаксиальных структур кремния диаметром до 150 мм для роста Ga(Al)N-соединений методом МОГФЭ

## Using 6-inch Ultrahigh-resistance Epitaxial Structures of Silicon for Ga(Al)N Compounds Growth by MOCVD Method

**Федотов С. Д.[1], к. т. н., Лундин В. В.[2], к. ф.-м. н., Заварин Е. Е.[2], к. ф.-м. н., Сахаров А. В.[2], к. ф.-м. н., Цацульников А. Ф.[2], д.ф.-м.н., Соколов Е. М.[1], Стаценко В. Н.[1], Егоркин В. И.[3], к. т. н., Земляков В. Е.[3], к. т. н., Зайцев А. А.[3], к. т. н., Чуканова О. Б.[3]**

*[1] АО «Эпиэл»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2*
*fedotov@epiel.ru*
*[2] НТЦ микроэлектроники РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*lundin@vpegroup.ioffe.ru*
*[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*ziko27@yandex.ru*

**Fedotov S. D.[1], Ph.D, Lundin W. V.[2], Ph.D, Zavarin E. E.[2], Ph.D, Sakharov A. V.[2], Ph.D, Tsatsulnikov A. F.[2], Sc.D, Sokolov E. M.[1], Statsenko V. N.[1], Egorkin V. I.[3], Ph.D, Zemlyakov V. E.[3], Ph.D, Zaitsev A. A.[3], Ph.D, Chukanova O. B.[3]**

*[1] Epiel JSC*
*bld. 2, 6 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*fedotov@epiel.ru*
*[2] Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS*
*26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021*
*lundin@vpegroup.ioffe.ru*
*[3] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*ziko27@yandex.ru*

В докладе показаны актуальные результаты разработки отечественной технологии выращивания гетероструктур на основе нитрида галлия (GaN) на сверхвысокоомных эпитаксиальных структурах кремния диаметром 150 мм. Получены структуры Ga(Al)N/Si диаметром до 150 мм с подвижностью электронов в 2DEG более 1500 $см^2В^{-1}с^{-1}$, изготовлены тестовые транзисторы GaN HEMT с напряжением отсечки порядка −6,5 В, максимальным током стока насыщения 570 мА/мм, крутизной транзисторов не менее 100 мСм/мм и пробивным напряжением более 200 В.

**Ключевые слова:** газофазная эпитаксия; ГФЭ; МОС-гидридная эпитаксия; МОГФЭ; III-N; нитрид галлия; GaN; транзисторы; HEMT; кремний; Si.

This report demonstrates actual results of the development of a domestic technology for growing heterostructures based on gallium nitride (GaN) on 6-inch ultra-high resistivity silicon epiwafers. 6-inch Ga(Al)N/Si heteroepitaxial wafers with an electron mobility in 2DEG higher than 1500 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ were obtained. Test GaN HEMT transistors were manufactured with a cutoff voltage about −6.5 V, maximum saturation drain current of 570 mA/mm, slope transistors more than 100 mS/mm and breakdown voltage higher than 200 V.
**Keywords:** vapor phase epitaxy; VPE; MOCVD; CVD; III-N; gallium nitride; GaN; transistors; HEMT; silicon; Si.

Гетероэпитаксия Ga(Al)N соединений методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) является практически единственным возможным способом промышленного изготовления гетероструктур, так как объемные подложки III-N до сих пор остаются коммерчески недоступными, а другие методы роста не обеспечивают сочетание необходимого качества и производительности. Для гетероэпитаксии GaN кремний в первую очередь привлекателен благодаря возможности использовать толстые подложки большого диаметра, обладающие достаточно низкой рыночной стоимостью и возможностью интеграции в технологию Si КМОП. Технология GaN на кремнии может стать основным драйвером на пути к повсеместному распространению широкозонных материалов в микроэлектронной промышленности.

Стоит отметить, что в ряде применений, таких как СВЧ, требуется использование диэлектрической или, как минимум, высокоомной подложки с удельным сопротивлением более 1 кОм·см. Существующие высокоомные подложки Si, получаемые методом бестигельной зонной плавки (БЗП), удовлетворяют данному требованию, но их стоимость при диаметре от 100 мм и более становится сравнимой с альтернативными дорогостоящими материалами, такими как объемный SiC, а сами подложки имеют свойство становиться проводящими после процесса роста (Ga, Al)N [1]. В связи с этим АО «Эпиэл» предлагает в качестве альтернативы использование уникальных сверхвысокоомных эпитаксиальных структур кремния. Ранее проведенные технологические работы показали, что наиболее качественный слой GaN возможно получить на подложках Si ориентацией (111) с разориентацией не более 1° [2].

Эпитаксиальный рост Ga(Al)N/Si-гетероструктур производился в НТЦ микроэлектроники РАН на МОГФЭ-установке «Dragon-125». Горизонтальный реактор с индуктивным нагревом позволяет наращивать Ga(Al)N-соединения с высокой скоростью: продолжительность процесса для HEMT-структур на Si составляет 1,5–2,5 ч [3]. Гетероструктуры были сформированы на сверхвысокоомных структурах кремния с удельным сопротивлением слоя Si >2 кОм·см на подложках марки КДБ-10.

Исследование поверхности слоев GaN с помощью оптической микроскопии и АСМ показало отсутствие трещин и структурных дефектов за пределами краевой области 5 мм. Среднеарифметическое отклонение профиля ($R_a$) поверхности составило не более 0,35 нм. Прогиб структур диаметром 150 мм при общей толщине (Ga,Al)N ~4 мкм не превышал 30 мкм. Измеренная методом Ван-дер-Пау подвижность электронов в 2DEG-канале для тестовых HEMT находилась в диапазоне

1520–1640 $см^2В^{-1}с^{-1}$ (300 K) при средней концентрации носителей заряда более $1{,}3 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$ и Rs около 300 Ом/квадрат (рис. 1).

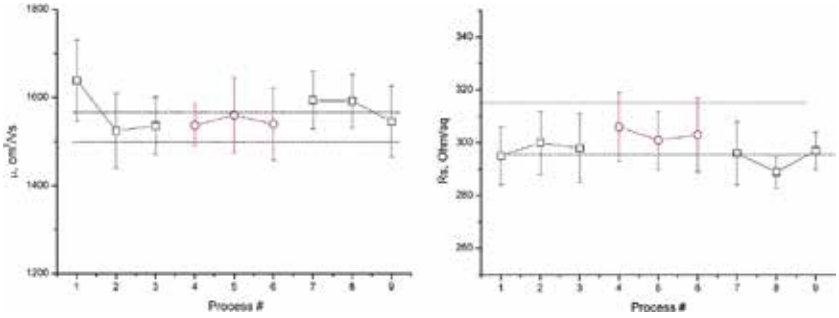



**Рис. 1.** На выращенных гетероструктурах диаметром 100 мм были сформированы тестовые HEMT-транзисторы с расстоянием между омическими контактами 6 мкм, длиной и шириной затвора 1,5 и 100 мкм соответственно. Технологический процесс изготовления транзисторов описан в работе [4]. Напряжение отсечки транзисторов составило порядка −6,5 В, а максимальный ток стока насыщения — 570 мА/мм при нулевом напряжении на затворе. Крутизна ВАХ транзисторов составила 112 мСм/мм, пробивное напряжение — не менее 200 В

***Литература***

1. Ghosh S. et al. Origin(s) of anomalous substrate conduction in MOVPE-grown GaN HEMTs on highly resistive silicon // ACS Appl. Electr. Mater., 2021. Vol. 3. P. 813–824.
2. Федотов С. Д. и др. Гетероэпитаксия Ga(Al)N для силовых HEMT на сверхвысокоомных структурах кремния // Наноиндустрия, 2020. — № S5-1 (102). — Т. 13. — С. 209–212.
3. Лундин В. В. и др. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // Научное приборостроение, 2017. — Т. 27. — № 1. — С. 5–9.
4. Егоркин В. И. и др. Исследование ионной имплантации азота через слой нитрида кремния для межприборной изоляции силовых GaN/Si-транзисторов // ПЖТФ, 2021. — Т. 47. — № 18. — С. 15–17.

Heteroepitaxy of Ga(Al)N compounds by MOVPE is practically the only possible way for the industrial fabrication of heterostructures, since bulk III–N substrates are still commercially unavailable, and other growth methods do not provide a combination of the required quality and productivity. This material is primarily attractive for GaN heteroepitaxy due to the possibility of using thick substrates with large diameters, which have a relatively low market price and the ability to integrate into Si CMOS technology. GaN-on-Si technology has the potential to be a major driver towards the omnipresence of wide-bandgap materials in the microelectronics industry.

It should be noted that in several applications, such as RF, it is required to use a dielectric or, at least, a high-resistance substrate with a resistivity of more than 1 kOhm·cm. The existing high-resistance Si substrates obtained by the floating zone method (FZ) fulfill

this requirement. Unfortunately, the cost of Si FZ wafers with a diameter of 4-inch and more becomes comparable with alternative expensive materials, such as bulk SiC, and the substrates themselves can turn into a conductive state after the growth process of (Ga, Al)N [1]. Due to this Epiel JSC offers an alternative – the ultra-high resistivity silicon epiwafers. It was shown beforehand that the highest-quality GaN layer can be obtained on Si (111) substrates with a misorientation angle lower than 1° [2].

Heteroepitaxy of Ga(Al)N compounds was carried out at SHM R&E Center RAS in Dragon 125 MOCVD system. Inductively heated horizontal reactor allows fast growth of Ga(Al)N: the process duration for HEMT on Si is 1.5–2.5 hours [3]. Ga(Al)N/Si heterostructures were formed on 7–13 Ohm·cm boron doped Cz Si substrates with an ultrahigh-resistance Si layer (resistivity > 2 kOhm·cm, > 100 μm) obtained at Epiel JSC.

Detailed study of the Ga(Al)N/Si surface was carried out by optical microscopy and AFM. No cracks or crystal defects were detected excluding 5 mm edge zone. Average roughness ($R_a$) of GaN was 0.35 nm. An insignificant positive curvature ≤30 μm was observed after cooling on the 6-inch heteroepitaxial wafers with ~4 μm Ga(Al)N thickness. Electron mobility in 2DEG at 300 K in the range 1520–1640 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ with an average concentration of charge carriers over $1{,}3 \cdot 10^{13}$ $cm^{-2}$ and Rs about 300 Ohm/sq for Ga (Al)N/Si wafers with HEMT was determined by the van der Pauw method (Fig. 1).

УДК 621.382.2/.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.201.202

# SiC — будущее силовых полупроводниковых приборов

## SiC — the Future of Power Semiconductor Devices

**Калашников В. В.**
*ООО «Остек-ЭК»*
*121467, г. Москва, Молдавская ул., 5, стр. 2*
*Kalashnikov.V@ostec-group.ru*

**Kalashnikov V. V.**
*Ostec-EC Ltd.*
*5/2 Moldavskaya St., Moscow, 121467, Russia*
*Kalashnikov.V@ostec-group.ru*

Мировой тренд, направленный на энергоэффективность и подогреваемый IoT, большими данными и искусственным интеллектом, выставляет новые требования для полупроводниковых приборов. Статья посвящена актуальным вопросам развития электроники из карбида кремния (SiC), роль которой сложно недооценить в XXI веке.
**Ключевые слова:** карбид кремния; $A^3B^5$; силовая электроника.

The global trend aimed at energy efficiency and fueled by IoT, Big Data and artificial intelligence is setting new demands on semiconductor devices. The article is devoted to topical issues of the development of silicon carbide (SiC) electronics, the role of which is difficult to underestimate in the 21st century.
**Keywords:** silicon carbide; $A^3B^5$; power electronics.

Карбид кремния (SiC) — это материал, находящийся на ранней стадии внедрения, но уже имеющий широкую область практического применения. Данный полупроводниковый материал относится к классу $A^3B^5$ и обладает широкой запрещенной зоной, способной поднять производительность силовых устройств до высочайшего уровня. SiC кристаллизуется во многих политипах. Наиболее часто выращиваемые материалы — 4H-SiC, 6H-SiC, 3C-SiC. Все политипы имеют высокую скорость насыщения носителями и высокую теплопроводность, что делает их подходящими для высокотемпературных и высокочастотных приложений. Полупроводники из карбида кремния обладают теплопроводностью, лучшей, чем Si, GaN, GaAs, что в сочетании с низким тепловым расширением и высокой прочностью придает этому материалу исключительные характеристики термостойкости. Расширенные характеристики карбида кремния обуславливают более широкое использование полупроводников из данного материала в различных отраслях, включая ИТ и телекоммуникации (5G), аэрокосмическую и оборонную промышленность (высокочастотные радиолокационные системы, спутниковая связь), возобновляемую энергетику, гражданскую промышленность, атомную энергетику, автомобилестроение и здравоохранение. То есть те области, где ключевыми факторами являются функциональность и надежность, а не стоимость.

Чтобы оценить возможности SiC MOSFET, можно сравнить их с Si-аналогами. Устройства SiC могут блокировать в 10 раз большие значения напряжения, чем кремний, иметь более высокую плотность тока, могут переходить между включенным и выключенным состояниями в 10 раз быстрее и имеют более низкое сопротивление

в открытом состоянии. Например, SiC MOSFET на 900 В может обеспечить такое же сопротивление в открытом состоянии, что и Si MOSFET, при размере кристалла в 35 раз меньше. Сочетание высоких скоростей переключения и высокое напряжение пробоя делают устройства из SiC идеальной альтернативой традиционным кремниевым силовым МОП-транзисторам, преобразователям DC-DC, системам бесперебойного питания и иным приложениям (рис. 1).

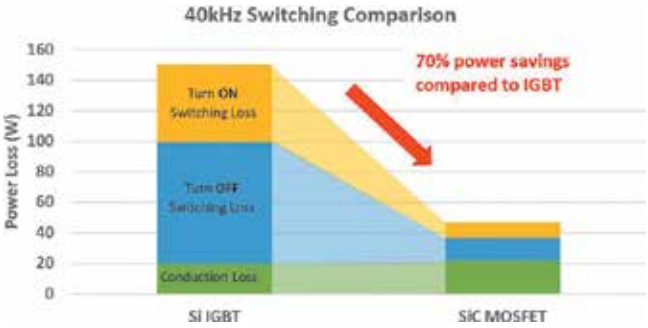



**Рис. 1.** Преимущества в производительности SiC MOSFET по сравнению с IGBT. Источник: Applied Materials

Использование SiC постоянно расширяется. Например, ожидается, что новая фабрика Cree будет производить силовые полупроводники SiC на 200-миллиметровых пластинах, что значительно снизит затраты на производство. А в исследовательском центре НАСА разработали новое, беспрецедентное в области высокотемпературной электроники поколение логических схем из карбида кремния. Ранее микросхемы SiC не могли выдерживать более нескольких часов при температуре 500 °C, теперь прототипы работают более 1000 часов при 500 °C. Такие характеристики, вероятно, связаны с предыдущими достижениями центра в области иридиевого интерфейсного стека (IrIS).

Хотя у устройств SiC есть захватывающий потенциал, существуют и производственные проблемы. Основная проблема — дефекты подложки. Иные сложности вызывает необходимость отжига при сверхвысоких температурах, достигающих 2000 °C. Имплантация SiC также требует высоких температур и довольно сложна.

Новаторы всего мира все больше сходятся во мнении, что обычное масштабирование транзисторов может замедляться, но инновации в области материаловедения наряду с прорывами в 2D/3D-архитектурах и новыми технологиями упаковки наверняка позволят создать усовершенствованные составные узлы ИС и пластины большего размера, которые будут способствовать внедрению SiC в крупносерийное производство.

***Литература***

1. Prospects for SiC electronics and sensors / Nick G. et al. // Materials Today, 2008. V. 11. № 1–2. P. 16–21.
2. Silicon carbide is paving the way for wider adoption of electric vehicles. [Электронный ресурс]. URL: https://blog.appliedmaterials.com/silicon-carbide-paving-way-wider-adoption-electric-vehicles.
3. Integrated circuit chips. [Электронный ресурс]. URL: https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-33.

УДК 669.018.95 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.203.205

# Как повысить КПД силовых модулей и снизить их массогабаритные показатели? Современные материалы и монтаж кристаллов по технологии «синтеринг» для производства элементов и модулей силовой электроники

## How to Increase the Efficiency of Power Modules and Reduce Their Weight and Dimensions? Modern Materials and Die Bonding Using Sintering Technology for Production of Elements and Modules for Power Electronics

**Иванов В. И.**
*ООО «Остек-ЭК»*
*121467, г. Москва, Молдавская ул., 5, стр. 2*
*ivanov.v@ostec-group.ru*

**Ivanov V. I.**
*Ostec-EC Ltd.*
*5/2 Moldavskaya St., Moscow, 121467, Russia*
*ivanov.v@ostec-group.ru*

Материалы с широкой запрещенной зоной (WBG — Wide Band Gap), такие как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC), уже исследованы и применяются рядом производителей для уменьшения размеров элементов и повышения эффективности преобразования энергии для силовой электроники. Но материал для монтажа кристаллов на диэлектрическую подложку также играет существенную роль, поэтому мы обсудим спекание (синтеринг, от англ. sintering) серебра (Ag).
**Ключевые слова:** силовая электроника; монтаж кристаллов; синтеринг.

Wide Band Gap (WBG) materials such as gallium nitride (GaN) and silicon carbide (SiC) have already been researched and used by a number of manufacturers to reduce elements size and improve energy efficiency for power electronics. Nevertheless, the material for die bonding on a dielectric substrate also plays a significant role, so we will discuss the sintering of silver (Ag).
**Keywords:** power electronics; die bonding; sintering.

Буквально за последнее десятилетие появилось несколько технологий монтажа кристаллов для сборки надежных высокотемпературных силовых модулей (температура p-n-перехода — свыше 175 °C). Это вызвано переходом от применения элементов на базе Si в сборке силовой электроники к элементам на базе SiC, которые дают целый ряд преимуществ (рис. 1).

Наравне с увеличением качественных параметров переход на SiC позволяет снизить массу и габариты силовых модулей почти в два раза (рис. 2).

Ag используется для монтажа полупроводниковых кристаллов с 90-х гг. прошлого века, а высокая надежность Ag соединений и их хорошие электромеханические свойства были известны еще раньше. Однако широкому применению препятствовали необходимость использования специального оборудования и низкая

пригодность для массового производства по причине высокой температуры плавления Ag. Поэтому технология синтеринга не одно десятилетие исследовалась и обсуждалась на международных конференциях до внедрения в производство. Сегодня благодаря синтерингу появилась возможность сборки силовых модулей высокой мощности, раскрывающих весь потенциал применения материалов с широкой запрещенной зоной. Синтеринг Ag создает бессвинцовое соединение, обеспечивающее более высокую рабочую температуру, теплопроводность и электропроводность, чем у припойных паст и бессвинцовых сплавов (рис. 3).

**Рис. 1.** Преимущества SiC перед Si

**Рис. 2.** Выигрыш в массогабаритных показателях, достигнутый за три года за счет внедрения полупроводниковых элементов на базе SiC, на примере инвертора

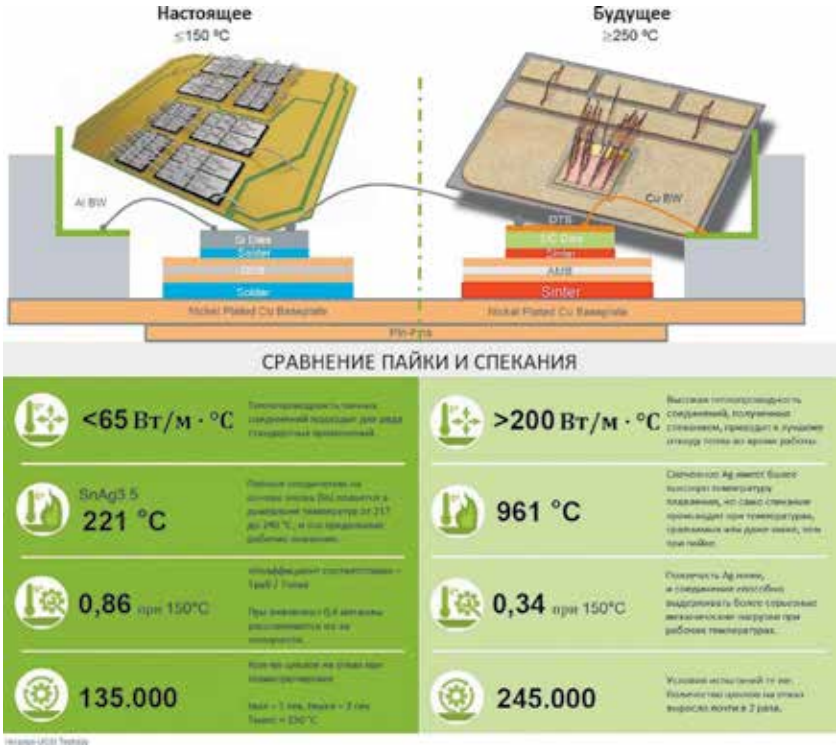



**Рис. 3.** Переход к сборке силовых модулей высокой мощности

***Литература***

1. https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/SiC.html.
2. https://www.rohm.com/news-detail?news-title=rohm-supplies-full-sic-power-modules-to-formula-e-racing-team-venturi&defaultGroupId=false.
3. Heraeus-UGSI Techday, June 2021.

УДК 546.05 + 548.55 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.206.208

# Управление прогибом структур кремния в технологии хлоридных газотранспортных реакций

## Controlling Silicon Wafer Bow in the Technology of Chloride Vapor Transport

**Баранов Ю. Н.[1], Тарасов Д. В.[1,2], Федотов С. Д.[1], Соколов Е. М.[1], Стаценко В. Н.[1], Гаврилов С. А.[2]**
*[1] АО «Эпиэл»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2*
*vstatsenko@epiel.ru, dmi7545@yandex.ru, fedotov@epiel.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*pcfme@miee.ru*

**Baranov Yu. N.[1], Tarasov D. V.[1,2], Fedotov S. D.[1], Sokolov E. M.[1], Statsenko V. N.[1], Gavrilov S. A.[2]**
*[1] Epiel JSC*
*bld. 2, 6 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*vstatsenko@epiel.ru, dmi7545@yandex.ru, fedotov@epiel.ru*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*pcfme@miee.ru*

Исследованы механические свойства поликристаллических слоев кремния в зависимости от температуры роста слоя при осаждении их методом CVT. Показано, что основным технологическим параметром, определяющим величину и направление прогиба кремниевых структур, является температура роста слоя кремния.
**Ключевые слова:** химический газотранспортный перенос; CVT; сэндвич-система; поликристаллический кремний; подложка кремния; прогиб пластины; силовая электроника.

The paper considers mechanical properties of polycrystalline silicon layers depending on the layer growth temperature during deposition process by CVT method. It has been shown that the main technological parameter that determines the value and direction of silicon wafers bow is the layer growth temperature.
**Keywords:** chemical vapor transport; CVT; sandwich-system; polycrystalline silicon; Si substrate; wafer bow; power electronics.

На сегодняшний день методы формирования кремниевых авто- и гетероэпитаксиальных слоев позволяют получать различные эпитаксиальные структуры для полупроводниковых приборов и интегральных схем. Наиболее распространенной технологией является метод химического осаждения из газовой фазы (ГФЭ, CVD). Основными преимуществами, обеспечившими методу CVD повсеместное распространение, являются его производительность и простота исполнения. Однако новые требования к технологическим параметрам слоев кремния для силовой электроники и различных структур на базе кремния (КСДИ, КНС, III-N-соединения)

заставляют искать и применять новые методы для формирования толстых кремниевых слоев. Кроме того, существующие методы не решают ряд технологических проблем, как, например, большой расход кремнийсодержащих реагентов и низкая скорость роста слоя при осаждении толстых Si-слоев. Следовательно, осаждение толстых кремниевых слоев и, как следствие, получение кремниевых структур для силовой электроники требует нового решения в кремниевой технологии.

Метод газотранспортного химического переноса (chloride vapor transport, CVT) кремния в сэндвич-системе (системе с малым зазором) позволяет решить задачу получения толстых слоев кремния [1]. Принцип этого метода заключается в переносе кремния от твердого источника через газообразные галогениды кремния на подложку при атмосферном давлении. С помощью данного CVT-метода можно получать толстые опорные поликристаллические слои для широкого ряда кремниевых структур. Так, на базе данного метода была успешно разработана и внедрена технология осаждения толстых Si-слоев для структур КСДИ на одном из отечественных предприятий. Толщина осаждаемых слоев кремния составила около 600 мкм при скорости роста 12 мкм/мин. Необходимо отметить, что данный CVT-метод также пригоден к наращиванию не только поликристаллических слоев, но и эпитаксиальных монокристаллических слоев кремния различной толщины [2].

Говоря о наращивании толстых слоев поликремния, необходимо отметить проблему деформации пластин и структур во время роста. В процессе роста слой поликремния претерпевает рекристаллизацию. Такой слой вызывает напряжения растяжения, и пластина выгибается, образуя прогиб. Были получены опытные образцы, на которых исследовались механические свойства поликремния в зависимости от температуры роста слоя и расхода газовых реагентов.

Чтобы избежать эффекта изгиба подложки, проводились исследования с нанесением многослойного поликремния, при котором каждый слой выращивался либо при температуре 950 °C, либо при 1100 °C. Скорость роста поликристаллического кремния варьировалась в пределах от 2 до 15 мкм/мин.

Анализ результатов работы показал, что основными технологическими параметрами, определяющими скорость роста Si-слоев, а также величину и направление прогиба кремниевых структур, являются температура роста кремниевых слоев, а также соотношение газовых реагентов в атмосфере реактора во время роста.

На данный момент продолжаются исследования в области отработки режимов осаждения кремниевых слоев для получения не только структур КСДИ с управляемой величиной прогиба, но и структур с малым значением кривизны для MOCVD III-N-соединений.

***Литература***

1. Способ формирования полупроводниковых структур: пат. 2393585C1 Рос. Федерация: МПК51 H01L 21/76 / А. Ф. Волков, В. В. Козихин, Е. М. Соколов, В. Н. Стаценко, В. Н. Степченков, К.-Г. М. Шварц; заявитель и патентообладатель ЗАО «ЭПИЭЛ». — № 2009115834/28; заявл. 28.04.2009; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. — 9 л.
2. Баранов Ю. Н. и др. Газотранспортный хлоридный перенос кремния в сэндвич-системе // Наноиндустрия, 2018. — №. 9. — С. 273–280.

Today, the methods of forming silicon auto- and heteroepitaxial layers make it possible to obtain various epitaxial structures for semiconductor devices and integrated circuits. The most common technology is chemical vapor deposition (CVD). The main advantages that have made CVD widespread are its productivity and ease of execution. However, new requirements for the technological parameters of silicon layers for power electronics and various structures based on silicon (dielectric isolated (DI) structures, silicon on insulator (SOI) structures, III-N semiconductors) force the search and application of new formation methods of thick silicon layers. In addition, existing methods do not solve a number of technological problems, such as a high consumption of silicon-containing reagents and a low layer growth rate during Si thick layer deposition. Consequently, Si layer deposition and, as a consequence, production of silicon structures for power electronics requires a new solution in silicon technology.

The method of chemical vapor transport (CVT) of Si in a sandwich-system (system with a small gap) makes it possible to solve a problem of obtaining thick silicon layers [1]. The principle of this method is to transfer silicon from a solid source through gaseous silicon halides onto a substrate at atmospheric pressure. This CVT method can produce thick polycrystalline support layers for a wide variety of silicon structures. Thus, based on this method, the technology of Si layer deposition for (DI) structures has been successfully developed and implemented at one of the domestic enterprises. The deposited silicon layer thickness is about 600 μm at a growth rate of 12 μm/min. It should be noted that CVT method is also suitable for growing not only polycrystalline layers, but also epitaxial monocrystalline silicon layers of various thicknesses [2].

Speaking about the growth of thick layers of polysilicon, it is necessary to note the problem of substrate warpage. During growth, the polysilicon layer undergoes recrystallization. Such a layer causes tensile stresses and substrate bends, forming a bow. Experimental samples have been obtained, to study the polysilicon mechanical properties depending on the layer growth temperature and gas reagent consumption.

To eliminate the effect of substrate bending, studies have been carried out with multilayer polysilicon deposition, with each layer grown either at 950 °C or at 1100 °C. The polycrystalline silicon growth rate varies in the range from 2 to 15 μm/min.

The analysis results have shown that the main technological parameters that determine the Si layer growth rate, as well as the value and direction of silicon structures bow, are Si layer growth temperature, as well as the gas reagent ratio in the reactor during growth.

Currently, researches continues in the field of working out the silicon layers deposition modes to obtain not only DI structures with a controlled warpage, but also structures with a low curvature value for MOCVD III-N compounds.

***References***

1. Patent RU2393585 “Method of Semiconductor Structure Formation” app. date 28.04.2009, publ. date 27.06.2010. (In Russian).
2. Baranov Y. N., Schwartz K. H. M., Sokolov E. M., Statsenko V. N., Fedotov S. D., Tarasov D. V. & Timoshenkov S. P. (2018). Atmospheric Pressure Chloride Transport in Epitaxial System. Nanoindustry Russia. 273–280.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.209.210

# Модульная тестовая платформа RXI — универсальная архитектура с безграничными возможностями

## Modular Test Platform RXI is the Universal Architecture with Infinity Opportunities

**Бочарова Е. А.**
*ООО «ФОРМ»*
*119530, г. Москва, Очаковское ш., 34, этаж 1, помещение I, комната 16*
*info@form.ru*

**Bocharova Ye. A.**
*FORM Co. Ltd*
*34 Ochakovskoe Ave., Moscow, 119530, Russia*

Представлены результаты первого этапа разработки конфигурируемой универсальной модульной тестовой платформы RXI для автоматизации функциональных испытаний современных микросхем. Отмечены основные технические характеристики и функциональные возможности модульной тестовой платформы RXI. Показаны преимущества применения платформы RXI на этапах разработки, производства, испытаний интегральных микросхем.
**Ключевые слова:** изготовление интегральных микросхем; контрольно-измерительное оборудование; испытания и контроль качества СБИС.

Модульная тестовая платформа RXI (далее система RXI) предназначена для автоматизации функциональных испытаний современных микросхем — микроконтроллеров, микропроцессоров, ПЛИС, СнК, содержащих ЦАП/АЦП, блоки памяти, последовательные интерфейсы, RF-блоки, а также микросхем статической и динамической памяти.

Система RXI гарантирует полное метрологическое соответствие заявленных характеристик (сертификат об утверждении типа средств измерений № 79675-20) и позволяет проводить испытания и контроль качества на всех стадиях жизненного цикла современных СБИС, включая:

- испытания и исследования вновь разработанных типов микросхем;
- производственные и приемочные испытания серийной продукции: квалификационные, периодические, отбраковочные, приемо-сдаточные;
- сертификационные испытания микросхем иностранного производства;
- входной контроль.

Система RXI создана по стандарту проектирования модульного АТЕ ФОРМ на основе 29-летнего опыта в измерениях СБИС и в тестеростроении.

При разработке выделены следующие приоритеты:

- развиваемые функциональные возможности АТЕ по стандарту RXI в течение жизненного цикла — не менее 20 лет;
- высокие технические и метрологические характеристики;
- многократное повышение производительности измерений;
- эргономика и функциональность АТЕ по стандарту RXI на мировом уровне;
- повышенная надежность АТЕ по стандарту RXI при эксплуатации.

Основные технические характеристики системы RXI определяются параметрами неизменной модульной тестовой платформы, а также конфигурацией и характеристиками применяемых измерительных модулей.

Аппаратно-программные и конструкторские решения, реализованные в модульной тестовой платформе, учитывают современные потребности электронной промышленности России при измерении современных микросхем.

***Литература***

1. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. — Введ 01.01.1996.
2. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.12.2019 № 3457 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы».

УДК 621.357.7 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.211.213

# Оптимизация процессов электрохимического осаждения

## Optimizing Electrochemical Deposition Processes

**Суханов Д. А.**
*ООО «Остек-ЭК»*
*121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2*

**Sukhanov D. A.**
*Ostec-EC Ltd.*
*5/2 Moldavskaya St., Moscow, 121467, Russia*

Проведен анализ мировых тенденций, технологий и систем в области гальванических процессов на полупроводниковом производстве, которые смогут оптимизировать процессы электрохимического осаждения. Проведен анализ методов и технологий электрохимического форматирования тонких металлических пленок на поверхности полупроводниковой пластины, а также систем электрохимического осаждения.
**Ключевые слова:** полупроводниковая пластина; электрохимическое осаждение; гальванические процессы.

Процессы электрохимического осаждения (ECD — electrochemical deposition) — основа микроэлектроники. Ведущие производители оборудования для ECD (Lam Research, RENA, ClassOne и др.) разработали каждый свою серию оборудования, чтобы передать пользователям свой опыт и оптимизировать производственные процессы.

Современные способы ECD основаны на тех же принципах, что и стандартная электролитическая ячейка, изображенная на рис. 1.

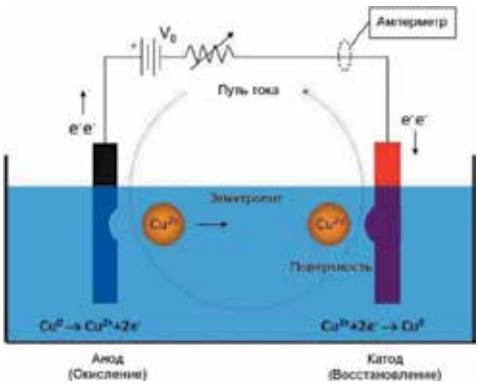



**Рис. 1.** Электролитическая ячейка. Источник: Advanced Semiconductor Plating — Key Fundamentals by Cody Carter and John Ghekiere [1]

Базовая электролитическая ячейка является основой всех ECD-реакторов. Ведущие «чип-майкеры» «требуют» использования реактора фонтанного типа, с расположенной пластиной лицевой стороной вниз и обработкой по одной пластине.

Каждый из основных компонентов, показанных на рис. 1, присутствует в современном реакторе (рис. 2).

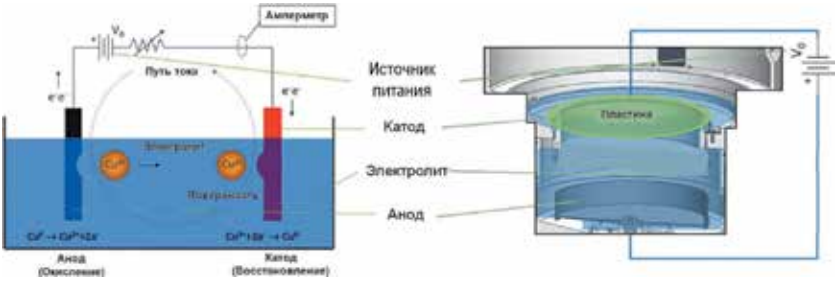



**Рис. 2.** Электролитическая ячейка и современный реактор. Источник: Advanced Semiconductor Plating — Key Fundamentals by Cody Carter and John Ghekiere

«Центр» между анодом и катодом имеет решающее значение в архитектуре ректора. Статическая пластина, будет испытывать внутреннюю линейную неоднородность. Эту ошибку можно исправить только более жесткой механической конструкцией, либо переходом к системе с вращением.

Когда «вязкая» жидкость движется по поверхности с некоторой скоростью, она создает профиль движения, при котором скорость уменьшается до нулевой относительно реальной поверхности. Слой жидкости, которая замедляется из-за этого эффекта, называется пограничным слоем.

Для эффективного нанесения покрытия желателен как можно более тонкий пограничный слой — диффузионный слой Нернста, который представляет собой область вблизи электрода, где концентрации ионов отличаются от их значений в объеме раствора [3].

Если диффузионный слой не имеет однородной толщины, то это приведет к неоднородному слою покрытия.

Современный реактор должен обеспечивать равномерный профиль движения жидкости по пластине.

Скорость электролита относительно поверхности пластины должна быть довольно высокой, чтобы образовался тонкий диффузионный слой.

При вращении пластины используются преимущества сложной физики погруженного вращающегося диска — «ноу-хау», которое у каждого производителя свое.

На рис. 3 показана динамика жидкости из «Теории пограничного слоя» доктора Германа Шлихтинга [4]. Задача современного ECD-оборудования — иметь радиальную симметрию.

Современный ECD-реактор использует все описанные выше эффекты.

На рис. 4 показаны типичные профили сканирования диаметра пластины и приведены рекомендации по устранению проблем.

Десятилетия электролитической ванны было достаточно для формирования ECD-пленок. С появлением процессов производства микроэлектронных изделий, использующих глубокие или сквозные отверстия, технологи оказались в тупике. Ни одна ECD-ванна не могла обеспечить заполнение таких отверстий.

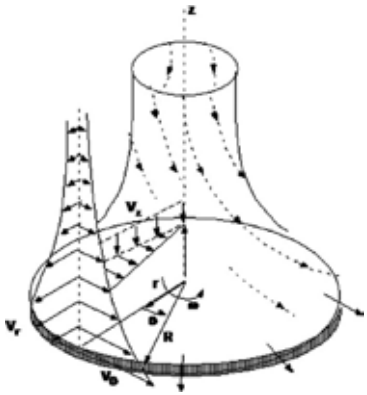


**Рис. 3.** Гидродинамика из теории пограничного слоя доктора Германа Шлихтинга. Источник: Boundary-Layer Theory by Dr. Hermann Schlichting

**Рис. 4.** Типичные профили сканирования диаметра. Источник: Electroplating Fundamentals: Optimizing Cross-wafer Uniformity by Cody Carter and John Ghekiere

Решение — современный ECD-реактор. Именно он позволил добиться необходимой однородности покрытия в отверстиях с аспектным соотношением до 1:10 и диаметром 20 мкм и по пластине в целом.

***Литература***

1. Advanced Semiconductor Plating — Key Fundamentals by Cody Carter and John Ghekiere, 2021.
2. Electroplating Fundamentals: Optimizing Cross-wafer Uniformity by Cody Carter and John Ghekiere, 2021.
3. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the “Gold Book”). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. https://doi.org/10.1351/goldbook.
4. Boundary-Layer Theory by Dr. Hermann Schlichting, 1955, Mc Graw-Hill Inc.

УДК 521.315.592 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.214.216

# Высокоомные структуры GaAs-AlGaAs для силовой электроники

## High-ohmic GaAs-AlGaAs Structures for Power Electronics

**Крюков В. Л.[1], Крюков Е. В.[2], Леви А. В.[3]**
*[1] ООО «МеГа Эпитех»*
*248033, г. Калуга, 2-й Академический проезд, 25*
*mega_epitech@elmatgroup.ru*
*[2] ООО «Эпиком»*
*248033, г. Калуга, 2-й Академический проезд, 25*
*evgenii.kryukov@mail.ru*
*[3] ООО «Мега СМ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 8, стр. 13*
*mega_sm@epitaxy.ru*

**Kryukov V. L.[1], Kryukov E. V.[2], Levi A. V.[3]**
*[1] MeGa Epitech LLC*
*25, 2nd Academichesky Lane, Kaluga, 248033, Russia*
*mega_epitech@elmatgroup.ru*
*[2] Epicom LLC*
*25, 2nd Academichesky Lane, Kaluga, 248033, Russia*
*evgenii.kryukov@mail.ru*
*[3] Mega SM LLC*
*10/1 Panfilovsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124489, Russia*
*mega_sm@epitaxy.ru*

Рассмотрены особенности конструкции высокоомных p-i-n-структур на основе системы GaAs-AlGaAs и способа их выращивания методом жидкофазной эпитаксии, которые позволяют получать силовые диоды, существенно превосходящие по совокупности основных параметров лучшие кремниевые аналоги. Разработанная технология позволяет эффективно управлять ключевыми параметрами p-i-n-структуры (обратное напряжение, быстродействие видом процесса обратного восстановления) заданием определенных режимов процесса эпитаксиального выращивания.
**Ключевые слова:** силовая электроника; жидкофазная эпитаксия; p-i-n-диод; соединения $A^3B^5$.

The paper presents an original method of manufacturing high impedance p-i-n structures based on GaAs-AlGaAs system by liquid phase epitaxy. It allows receiving power diodes, significantly surpassing of the aggregate basic parameters of the best silicon counterparts. Feature of this technology is the ability to effectively manage key parameters of p-i-n structures (reverse voltage, speed, “softness” of the process of reverse recovery, temperpature dependence of VAC) by setting the required process conditions.
**Keywords:** power electronics; liquid phase epitaxy; p-i-n diod; $A^3B^5$ compounds.

Интенсивное внедрение во всем мире энергосберегающих технологий предъявляет к устройствам и приборам силовой электроники все более жесткие

требования, выполнить которые, используя традиционную электронно-компонентную базу на основе кремния, не всегда представляется возможным. Поэтому усиливается интерес к более широкозонным материалам, в том числе к арсениду галлия и к системе твердых растворов на его основе GaAs-AlGaAs. Свойства арсенида галлия, такие как прямозонная структура, высокая подвижность электронов, малое время жизни неосновных носителей заряда, высокое кристаллическое совершенство, возможность формирования гетерокомпозиций в системе GaAs-AlGaAs, позволяют реализовать целый ряд уникальных приборов. Тем не менее, в настоящее время арсенид галлия как материал силовой электроники не получил пристального внимания разработчиков в силу отсутствия надежного метода получения высокоомного эпитаксиального материала, способного обеспечить высокие пробивные напряжения.

Для получения высоких значений пробивного напряжения и малых потерь при переключении требуется эпитаксиальная p-i-n-структура, имеющая протяженные слои с низкой концентрацией примеси. Наиболее эффективно эта задача решается с помощью метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), обладающего низкой себестоимостью технологического процесса, простотой использования оборудования и возможностью выращивания многослойных композиций большой толщины.

В настоящей работе для выращивания высокоомных p-i-n-структур применялось ростовое графитовое устройство прокачного типа. Структуры состояли из трех последовательных эпитаксиальных слоев GaAs-AlGaAs: буферный слой p-типа проводимости, рабочий $p^-$-i-$n^-$-слой и контактный $n^+$-слой. Ключевые параметры p-i-n-структуры (обратное напряжение, быстродействие, «мягкость» процесса обратного восстановления) во многом определяются особенностями профиля распределения концетрации носителей в базовой области, который в рамках используемого метода можно эффективно регулировать заданием требуемых технологических режимов: например, изменением толщины p-области можно в широком диапазоне управлять временем обратного восстановления.

Основной проблемой при выращивании высокомных структур GaAs из графитовой оснастки является загрязнение углеродом. В настоящей работе проблема была решена применением оригинального метода, в котором используется легирование специальными окислами. Окислы активно взаимодействуют с фоновыми примесями раствора-расплава, переводя их в неактивное состояние. Использование метода позволило получить в графитовой оснастке эпитаксиальные слои с крайне низкой концентрацией фоновых примесей и, соответственно, протяженные высокоомные области. Проведенные исследования распределения внутреннего поля в базовой области p-i-n-структуры при обратном смещении позволяют сделать вывод о малой протяженности p-области при большом градиенте концентрации примеси. В то же время со стороны n-области поле распространяется практически на всю ее длину, т. е. вся n-область содержит небольшой градиент концентрации донорной примеси.

По результатам проведенных исследований получены высокоомные структуры GaAs-AlGaAs для p-i-n-диодов со следующими основными параметрами:

- прямые напряжения, $U_г$ — 1,3–1,8 В,
- обратные напряжения, $U_г$ — 400–1200 В,
- время обратного восстановления, $t_{гг}$ — 20–70 нс при независимости от температуры,

- максимальная рабочая температура кристалла — до 250 °C.

На основе полученных результатов активно ведется разработка гетероструктур GaAs-AlGaAs для высоковольтных биполярных и JFET-транзисторов.

The intensive energy saving solution improvement over the world imposes ever more hard requirements to power electronics devices and equipment. It can't be realized using the traditional silicon-based components in any case. That is why there is a growing interest to wide-gap materials including GaAs and GaAs-AlGaAs based system of solid solutions. Such GaAs properties as direct gap, high electron mobility, low lifetime of minor carriers, high lattice perfection, possibility to form the hetero-compositions in GaAs-AlGaAs system makes it possible to design a wide range of unique devices. Nevertheless GaAs as a power electronics material doesn't attract close attention as there is no valid method of making a high-ohmic epitaxial material that could provide the high breakdown voltages. The epitaxial p-i-n structure with extended low impurity concentration layers are required to achieve high breakdown voltages and low switching loss. This problem can be solved most efficiently by means of liquid phase epitaxy technique which is notable for low processing cost, simplicity of equipment and the growth of multi-layer high thick compositions possibility.

In this investigation the graphite growing unit of pumping type was used for high-ohmic p-i-n structures growth. The structures were made of three successive GaAs-AlGaAs layers: buffer layer with p-type of conductivity, $p^-$-i-$n^-$ working layer and the ohmic $n^+$-layer. The key parameters of p-i-n structure such as reverse voltage, speed performance, "softness" of the reverse recovery process depend upon features of charge carrier density profile in base area that can be efficiently adjusted within the frames of this method by means of the growth process parameters modification. For example, the reverse recovery time can be handled by p-area thick corrections within the wide range. The contamination by carbon is the main problem at high-ohmic GaAs structure growth from the graphite unit. In this work the problem has been solved by using an original method of specific oxides doping. These oxides interact actively with background impurities in solution-melt and transform these into inactive state. This method gives an opportunity to grow the epitaxial layers with extremely low background impurities concentration and accordingly the extended high-ohmic regions.

The fulfilled investigations of the internal field configuration in base area of p-i-n structure at the reverse bias permit making conclusion on the short extension of p-region at high impurity concentration gradient. At the same time in n-region the field covers the full length of this region practically, that is the whole n-region contains small donor impurity concentration gradient.

According to the results of these investigations the high-ohmic GaAs-AlGaAs structures for p-i-n diodes have been made with the following main parameters:

- forward voltage, $U_f$ — 1.3–1.8 V;
- reverse voltage, $U_r$ — 400–1200 V;
- reverse recovery time, $t_{rr}$ — 20–70 ns, independent from temperature;
- highest working temperature of chip — up to 250 °C.

Based on the obtained results GaAs-AlGaAs heterostructures for high-voltage bipolar and JFET transistors are being actively developed.

УДК 621.315.592.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.217.219

# Гетероструктуры GaAs-AlGaAs для приборов персонализированной медицины

## GaAs-AlGaAs Heterostructures for Personalized Medicine Devices

**Крюков В. Л.[1], Крюков Е. В.[2], Васильчиков А. С.[1]**
*[1] ООО «МеГа Эпитех»*
*248033, г. Калуга, 2-й Академический проезд, 25*
*mega_epitech@elmatgroup.ru*
*[2] ООО «Эпиком»*
*248033, г. Калуга, 2-й Академический проезд, 25*
*evgenii.kryukov@mail.ru*

**Kryukov V. L.[1], Kryukov E. V.[2], Vasilchikov A. S.[1]**
*[1] MeGa Epitech LLC*
*25 2nd Academichesky Lane, Kaluga, 248033, Russia*
*mega_epitech@elmatgroup.ru*
*[2] Epicom LLC*
*25 2nd Academichesky Lane, Kaluga, 248033, Russia*
*evgenii.kryukov@mail.ru*

Проведены исследования совокупности технологических факторов, позволяющих получать специализированные гетероструктуры GaAs-GaAlAs с высокой мощностью излучения, малым отклонением длины волны электролюминесценции от номинального значения (не более ±3 нм) и высокой стабильностью параметров в процессе эксплуатации, предназначенные для использования в приборах персонализированной медицины.
**Ключевые слова:** жидкофазная эпитаксия; гетероструктуры GaAs-GaAlAs; светоизлучающие диоды.

The investigations of the processing factors combination have been carried that allow making the customizable GaAs-AlGaAs heterostructures for personalized medicine devices with high emission power, close tolerance of electroluminescence peak wave length (not more than ±3 nm), and high parameters in-use stability.
**Keywords:** liquid phase epitaxy; GaAs-AlGaAs heterostructures; light emitting diodes.

В условиях пандемии COVID-19 показатель содержания кислорода в крови стал одним из важнейших критериев состояния пациентов, определяющих необходимость принятия экстренных мер, а портативный пульсоксиметр стал неотъемлемым аксессуаром как отделений интенсивной терапии, так и врачей скорой помощи. Исследования взаимосвязи характеристик светодиодов и показателей точности измерения уровня сатурации пульсоксиметров показывают, что светодиоды являются главным источником ошибки измерений. Точность датчика пульсоксиметра существенно зависит от величины отклонения реальных значений длины волны и мощности излучения светодиода от номинальных значений, заложенных в конструкции прибора, возникших как при производстве прибора, так и в процессе его эксплуатации вследствие эффекта деградации. Настоящая работа посвящена исследованию совокупности технологических факторов, позволяющих

получать специализированные гетероструктуры GaAs-GaAlAs с высокой мощностью излучения, малым отклонением длины волны электролюминесценции от номинального значения (не более ±3 нм) и высокой стабильностью параметров в процессе эксплуатации, предназначенные для использования в приборах персонализированной медицины.

В рамках проведенных исследований разработан метод формирования активной области с применением двукратной смены растворов-расплавов, позволяющий существенно подавить перенос избыточного алюминия из предыдущего раствора-расплава за счет последовательного удаления этого компонента из ростового зазора. Применение метода позволяет уменьшить величину разброса длины волны излучения до значений 2–3 нм. Показано, что толщина активной области оказывает значительное влияние на величину выходной мощности излучения. Так, в зависимости от номинала длины волны излучения максимальная мощность излучения достигается при оптимальной толщине активной области в диапазоне 1,0–1,4 мкм. Установлено, что введение в раствор-расплав иттербия в оптимальной концентрация 0,3 ат.% позволяет без ущерба для качества поверхности повысить мощность излучения в зависимости от номинала длины волны излучения в диапазоне 11–16 %. Рост мощности связан со снижением концентрации центров безызлучательной рекомбинации вследствие эффекта геттерирования фоновых примесей. При этом одновременно имеет место улучшение устойчивости гетероструктур к процессам деградации.

Исследования влияния структурного совершенства гетероструктур на процессы временной деградации мощности излучения показали существенные преимущества гетероструктур AlGaAs на подложках GaAs, выращенных методом вертикальной направленной кристаллизации (VGF) с плотностью дислокаций $(2–5)\cdot10^3$ см$^{-2}$ по сравнению с подложками GaAs, выращенными методом Чохральского (LEC) с плотностью дислокаций $(2–4)\cdot10^4$ см$^{-2}$. В ходе испытаний на устойчивость к процессам деградации было установлено, что использование подложечного материала с низкой плотностью дислокаций позволяет повысить уровень устойчивости гетероструктур к процессам деградации до уровня 94–97 %. Использование совокупности вышеуказанных технологических факторов является критически значимым для процессов выращивания специализированных гетероструктур GaAs-GaAlAs для приборов персонализированной медицины. Практическая реализация полученных результатов позволяет снизить величину отклонения длины волны излучения от номинального с ±8 нм до ±3 нм как по площади гетероструктур, так и в товарной партии, увеличить мощность излучения в зависимости от типа гетероструктуры на 11–16 % и повысить уровень устойчивости к деградации оптической мощности излучения при 1000-часовой наработке до уровня 94–97 % при исходном значении 82–89 %.

COVID19 pandemic has turned the oxygen saturation measurement in blood into one of the primary patient status criteria that specify the need of first response emergency. Now the portable pulse oxymeter is an integral feature both for intensive care units and for emergency doctors. The investigations of the interconnection between LED parameters and oxygen saturation measurements accuracy demonstrate that LEDs are the main source of measurement errors. The pulse oxymeter sensor accuracy is dependent essentially upon

tolerances of LED real peak wave length and emission power values for their design values forced either at device manufacture or due to ageing degradation. The present work is devoted to the investigations of the processing factors combination that is capable of making the customizable GaAs-AlGaAs heterostructures for personalized medicine devices with high emission power, close tolerance of electroluminescence peak wave length (not more than ±3 nm), and high parameters in-use stability. Within the framework of this study the method of active area forming via double solution-melt replacement has been developed. It provides the suppression of previous solution-melt excess aluminium transfer by means of this component consecutive elimination from growth gap. This method makes it possible to reduce LED peak wave length tolerance to 2–3 nm. It has been shown that level of emission power is dependent essentially upon active area thickness. So the maximal emission power is achieved at the optimal active area thickness range of 1.0–1.4 microns depending on peak wave length nominal. It has been found that 0.3 at.% optimal concentration of ytterbium doping into solution-melt results in increase of emission power in the range of 11–16 % depending on peak wave length nominal without any surface quality degradation. This emission power rising is conditioned by the reduction of non radiative recombination centers concentration due to the background impurities gettering. Besides there is the stability improvement of heterostructures against degradation. The investigation of the influence of heterostructures structural perfection on emission power degradation processes has shown the essential advantages of AlGaAs heterostructures on vertical gradient freeze grown GaAs substrates with $(2–5)\cdot10^3$ $cm^{-2}$ dislocation density against the Liquid Encapsulation Czochralski grown GaAs substrates with $(2–4)\cdot10^4$ $cm^{-2}$ dislocation density. During the course of the degradation stability tests it has been established that the usage of low dislocation density substrate material works towards the heterostructures degradation stability improvement up to 94–97 %. The usage of above mentioned technology factors combination crucial in growing the customizable GaAs-AlGaAs heterostructures for personalized medicine devices. Implementation of these results makes it possible to reduce the LED peak wave length tolerance from ±8 nm to ±3 nm as per cross-section area as within the production lot, to force the emission power on 11–16 % depending on peak wave length nominal and to improve the level of optical emission power degradation stability after 1000 h in service up to 94–97 % in contrast with the former 82–89 %.

УДК 621.375.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.220.222

# Разработка отечественной электронной компонентной базы силовой электроники на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия

## Developing Domestic Electronic Components of Power Electronics Based on Heteroepitaxial Structures of Gallium Nitride

**Ерофеев Е. В.[1], Полынцев Е. С.[2]**
*[1] АО «Научно-производственная фирма «Микран»*
*634043, г. Томск, пр. Кирова, 51д*
*erofeev@micran.ru*
*[2] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

**Erofeev E. V.[1], Polyntsev E. S.[2]**
*[1] Micran Research and Production Company*
*51d Kirova Ave., Tomsk, 634043, Russia*
*erofeev@micran.ru*
*[2] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR University)*
*40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia*

В данной статье представлены результаты разработки отечественных силовых транзисторов и диодов с барьером Шоттки на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия. Представлены электрические характеристики разработанных изделий в бескорпусном исполнении по постоянному току.
**Ключевые слова:** силовая электроника; электронная компонентная база; нитрид галлия; транзистор; диод.

This paper describes the results of developing domestic power transistors and diodes with a Schottky barrier based on heteroepitaxial structures of gallium nitride. The electrical characteristics of dies of the developed products have been presented for direct current.
**Keywords:** power electronics; electronic components; nitride gallium; transistor; diode.

Силовая электроника — это показатель уровня экономики любого современного государства. Ее решающая роль в экономике развитых стран вытекает их того, что более 80% вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде. Области применения силовой электроники с каждым годом расширяются в геометрической прогрессии. Невозможно построить практичные компьютеры, мобильные телефоны, устройства для обработки персональных данных, автомобили, самолеты, производственные процессы и множество других повседневных устройств без силовой электроники.

Многие десятилетия кремний (Si) оставался доминирующим материалом для создания устройств силовой электроники. Однако в процессе своей эволюции силовые Si-устройства достигли своего физического предела. Поэтому следующим шагом в развитии устройств силовой электроники является переход к широкозонным полупроводникам, таким как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC). Появление

гетероперехода на границе контакта AlGaN/GaN дает устройствам на основе нитрида галлия огромные преимущества над Si- и SiC-аналогами. Высокая концентрация носителей и их высокая подвижность позволяют использовать гетеропереход в качестве канального слоя с крайне низким удельным сопротивлением, что, в свою, очередь позволяет пропускать через канал больший удельный ток. Большая ширина запрещенной зоны позволяет устройствам на основе GaN работать при больших рабочих температурах и более высокой скорости переключения при меньших потерях мощности. Следовательно, у них есть потенциал для применения в системах управления двигателями, системах распределения энергии, электромобилях и авионике.

В данной работе представлены результаты разработки отечественных силовых транзисторов и диодов с барьером Шоттки на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия.

Разработанные силовые GaN-транзисторы в бескорпусном исполнении имеют следующие электрические характеристики: пороговое напряжение $U_{пор}$ = 1 В, максимальный постоянный ток сток-исток $I_{си}$ = 20 А, максимальное напряжение сток-исток $U_{си}$ = 250 В, сопротивление открытого канала $R_{си}$ = 35 мОм, ток утечки сток-исток $I_{си0}$ = 50 мкА, прямой ток утечки затвор-исток $I_{зи}$ = 2 мА, входная емкость $C_{вх}$ = 800 пФ.

Разработанные силовые GaN-диоды с барьером Шоттки в бескорпусном исполнении имеют следующие электрические характеристики: пороговое напряжение $U_{пор}$ = 0,84 В, прямое напряжение $U_{пр}$ = 1,7 В, прямой ток диода $I_{пр}$ = 4 А, максимальное обратное напряжение $U_{обр}$ = 300 В, обратный ток утечки $I_{обр}$ = 6,5 мкА, входная емкость $C_{вх}$ = 250 пФ.

Разработанные изделия могут быть успешно использованы при создании источников вторичного электропитания высокой эффективности.

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.577.21.0204 от 27.10.15). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57715X0204.***

***Литература***

1. GaN-on-Silicon wafers: the enabler of GaN power electronics // Power Devices, 2012. № 4. P. 6–9.
2. Würfl J., Hilt O., Bahat-Treidel E., Zhytnytska R., Klein K., Kotara P., Brunner F., Knauer A., Krüger O., Weyers M., Tränkle G. Technological approaches towards high voltage, fast switching GaN power transistors // ECS Trans., 2013. V. 52. № 1. P. 979–989.
3. Bahat-Treidel E., Hilt O., Zhytnytska R., Wentzel A., Meliani C., Wurfl J., Trankle G. Bahat-Treidel E. Fast-switching GaN-based lateral power Schottky barrier diodes with low onset voltage and strong reverse blocking // IEEE Electron Device Letters, 2012. V. 33. № 3. P. 357–359.
4. Lenci S., De Jaeger B., Carbonell L., Hu J., Mannaert G., Wellekens D., Decoutere S. Au-free AlGaN/GaN power diode on 8-in Si substrate with gated edge termination // IEEE Electron Device Letters, 2013. V. 34. № 8. P. 1035–1037.
5. Hu J., Stoffels S., Lenci S., Bakeroot B., De Jaeger B., Van Hove M., Decoutere S. Performance optimization of Au-free lateral AlGaN/GaN Schottky barrier diode with gated edge termination on 200-mm silicon substrate // IEEE Transactions on Electron Devices, 2016. V. 63. № 3. P. 997–1004.

Power electronics is an indicator of economy welfare of any contemporary state. Its decisive role in the economy derives from the fact that more than 80 % of the generated electricity is consumed in a converted form. The fields of application of power electronics are expanding exponentially every year. It is impossible to build practical computers, mobile phones, cars, airplanes, manufacturing processes, and many other everyday devices without power electronics.

Many decades, silicon (Si) was dominating material for power electronics devices. However, Si power devices have already reached their physical limit. Therefore, the next step in the development of power electronics devices is the transition to wide-gap semiconductors such as gallium nitride (GaN) and silicon carbide (SiC). A heterojunction at the AlGaN/GaN interface gives gallium nitride devices enormous advantages over their Si and SiC counterparts. The high concentration of carriers and their high mobility make it possible to use the heterojunction as a channel layer with an extremely low resistivity, which ensures the flow of currents with an extremely high density in channel of GaN devices. The wide band gap allows GaN devices to operate at higher operating temperatures and faster switching speeds with less power loss. Hence, they have the potential for applications in engine control systems, power distribution systems, electric vehicles and avionics.

This paper presents the results of the development of domestic power transistors and diodes with a Schottky barrier based on heteroepitaxial structures of gallium nitride.

The developed dies of power GaN transistors have the following electrical characteristics: threshold voltage $V_{th}$ = 1 V, maximum drain-source current $I_{ds}$ = 20 A, maximum drain-source voltage $V_{ds}$ = 250 V, on-resistance $R_{on}$ = 35 mΩ, drain-source leakage current $I_{ds0}$ = 50 μA, forward gate-source leakage current $I_{gs}$ = 2 mA, input capacitance $C_{in}$ = 800 pF.

The developed dies of power GaN Schottky barrier diodes exhibit the following specific electrical characteristics: threshold voltage $V_{ON}$ = 0,84 V, forward voltage $V_F$ = 1,7 V, direct current of the diode $I_F$ = 4 A, maximum reverse voltage $V_{br}$ = 300 V, reverse leakage current $I_r$ = 6,5 μA, input capacitance $C_{in}$ = 250 pF.

The developed products can be successfully used in high-efficiency power supplies.

***This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement № 14.577.21.0204 of October 27, 15). Unique project identifier RFMEFI57715X0204.***

***References***

1. GaN-on-Silicon wafers: the enabler of GaN power electronics. Power Devices, 2012. №.4. P. 6–9.
2. Würfl J., Hilt O., Bahat-Treidel E., Zhytnytska R., Klein K., Kotara P., Brunner F., Knauer A., Krüger O., Weyers M., Tränkle G. Technological approaches towards high voltage, fast switching GaN power transistors // ECS Trans. V. 52. № 1. 2013. P. 979–989.
3. Bahat-Treidel E., Hilt O., Zhytnytska R., Wentzel A., Meliani C., Wurfl J., Trankle G. Fast-switching GaN-based lateral power Schottky barrier diodes with low onset voltage and strong reverse blocking // IEEE Electron Device Letters, 2012. V. 33. № 3. P. 357–359.
4. Lenci S., De Jaeger B., Carbonell L., Hu J., Mannaert G., Wellekens D., Decoutere S. Au-free AlGaN/GaN power diode on 8-in Si substrate with gated edge termination // IEEE Electron Device Letters, 2013. V. 34. № 8. P. 1035–1037.
5. Hu J., Stoffels S., Lenci S., Bakeroot B., De Jaeger B., Van Hove M., Decoutere S. Performance optimization of Au-free lateral AlGaN/GaN Schottky barrier diode with gated edge termination on 200-mm silicon substrate // IEEE Transactions on Electron Devices, 2016. V. 63. № 3. P. 997–1004.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.223.224

# Применение численного моделирования при учете влияния накопленной дозы ионизирующего излучения на деградацию параметров n-канального транзистора с проектной нормой 0,18 мкм

## Applying Numerical Modeling for Studying the Effect of the Accumulated Dose of Ionizing Radiation on the Degradation of the Parameters of an n-Channel Transistor with a 0.18 μm Technology Node

**Лагаев Д. А.[1,2], Ключников А. С.[2], к. т. н., Шелепин Н. А.[2], д. т. н., Селецкий А. В.[2], к. т. н.**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*[2] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dlagaev@niime.ru, aklyuchnikov@niime.ru, nchelepin@niime.ru, aseletskiy@niime.ru*

**Lagaev D. A.[1,2], Klyuchnikov A. S.[2], Ph.D, Shelepin N. A.[2], Sc.D, Seletskiy A. V.[2], Ph.D**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*[2] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dlagaev@niime.ru, aklyuchnikov@niime.ru, nchelepin@niime.ru, aseletskiy@niime.ru*

В работе с помощью численных методов исследуется влияние эффективной плотности положительного заряда на ток утечки n-канального транзистора. Установлено соответствие между поверхностной плотностью положительного заряда и накопленной дозой гамма-излучения. Приводится сравнение эксперимента с результатами моделирования.
**Ключевые слова:** КМОП КНИ; ионизирующее излучение; численное моделирование.

The paper discusses the capabilities of the TCAD instrumental-technological modeling environment when investigating the effect of the positive charge density on the leakage current of an n-channel transistor. Correspondence was established between the leakage currents and the positive charge density in the transistor for various accumulated doses. The comparison of the experiment with the simulation results has been given.
**Keywords:** CMOS SOI; ionizing radiation; numerical simulation.

Применение технологии «кремний на изоляторе» (КНИ) [1] привело к необходимости более глубокого понимания причин деградации электрических параметров интегральных схем (ИС) при воздействии ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства, в частности при воздействии гамма-излучения. Согласно работам [2, 3] одним из основных факторов деградации ИС космических аппаратов является захват положительного заряда на глубоких ловушечных уровнях в объеме диэлектрика, что приводит к формированию дополнительных путей для протекания токов утечки вдоль границ изоляции [4].

Появление пакетов программ численного моделирования существенным образом упростило задачи по выявлению причин ускоренной деградации отдельных элементов ИС и их своевременному устранению. В связи с этим все большую популярность набирают методы численного моделирования, основанные на решении системы фундаментальных уравнений, при анализе воздействия ИИ на отдельные элементы ИС [5–7]. Однако общим недостатком представленных работ является невозможность использования полученных параметров ловушек при исследовании поведения приборов, выполненных по отличающейся технологии.

В связи с невозможностью достоверно определить параметры ловушек без проведения ряда предварительных экспериментальных исследований моделирование воздействия гамма-излучения выполнено в первом приближении путем задания плотности эффективного положительного заряда на границе $Si/SiO_2$. Для исследования влияния плотности положительного заряда на величину тока утечки была разработана модель n-канального транзистора по технологии 0,18 мкм. Обеспечение высокой доверительной вероятности получаемых результатов моделирования осуществлялось путем калибровки разработанной модели, что включало в себя проведение технологического и приборного моделирования в среде TCAD Sentaurus в целях получения соответствия между численным и натурным экспериментом.

В результате сравнения численного моделирования с экспериментом установлено соответствие между плотностью положительного заряда в транзисторе и накопленной дозой гамма-излучения. По результатам работы сделаны следующие выводы:

- использование пакета TCAD Sentaurus обеспечивает получение достоверных результатов характеристик транзисторов при моделировании эффектов накопленной дозы ИИ;
- с помощью TCAD возможно установить соответствие между накопленной дозой излучения и поверхностной плотностью положительного заряда;
- моделирование накопленной дозы путем задания ловушек требует проведения дополнительных исследований, направленных на уточнение их параметров.

***Литература***

1. Способ изготовления структуры кремния на изоляторе. Патент РФ № 2412504. 2011 / Г. Я. Красников, С. Г. Тадевосян, С. О. Ранчин, А. Г. Шелегеда.
2. Schwank J. R. et al. Radiation effects in SOI technologies // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003. V. 50. № 3. P. 522–538.
3. Schwank J. R. et al. Radiation effects in MOS oxides // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. V. 55. № 4. P. 1833–1853.
4. Селецкий А. В., Шелепин Н. А. Проектирование и разработка элементов КМОП СБИС, предназначенных для функционирования в условиях воздействия космических ионизирующих излучений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 2. — С. 39–45.
5. Тихомиров П., Пфеффли П., Боргес Р. Моделирование деградации и обратимых отказов полупроводниковых приборов с использованием TCAD Sentaurus // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2015. — № 10. — С. 142–149.
6. Passeri D., Morozzi A. TCAD radiation damage model, 2019. — № AIDA-2020-D7. 4.
7. Chatzikyriakou E., Potter K., de Groot C. H. A systematic method for simulating total ionizing dose effects using the finite elements method // Journal of computational electronics, 2017. V. 16. № 3. P. 548–555.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.225.226

# Факторы, влияющие на линейные размеры туннельного оксида кремния в технологии EEPROM

## Contributing Factors for the Tunnel Silicon Oxide Critical Dimensions in EEPROM Technology

**Кирюшина И. В., к. т. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*ikiryushina@niime.ru*

**Kiryushina I. V., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*ikiryushina@niime.ru*

Определены факторы, влияющие на линейные размеры туннельного $SiO_2$ в технологии EEPROM. Приведены способы формирования структуры, позволяющие обеспечивать разницу CD между фоторезистивной маской и вытравленной жидкостным способом структурой в 0,1 мкм. Рекомендованы значения параметров процессов фотолитографии, контроля CD и ПХ-зачистки для обеспечения требуемых размеров элемента.
**Ключевые слова:** туннельный оксид кремния; технология EEPROM; линейные размеры; жидкостное химическое травление в буферном травителе; ПХ-зачистка.

The paper highlights contributing factors for the tunnel $SiO_2$ critical dimensions in EEPROM technology. In addition, it gives methods of forming the structure that allow providing a CD difference between a photoresist mask and a structure etched by a liquid method of 0.1 μmm. The values of the parameters of the photolithography, CD control and descum processes have been recommended to ensure the required element sizes.
**Keywords:** tunnel silicon oxide; EEPROM technology; critical dimensions; wet chemical etching in buffered oxide etchant; descum.

Целью работы является изучение технологических факторов, влияющих на линейные размеры туннельного оксида кремния в технологии EEPROM, после жидкостного химического травления (ЖХТ) $SiO_2$ в буферном травителе [1].

Работа выполнялась на пластинах 200 мм и фотолитографическом кластере SCREEN SK2000 — ASML750 (KrF), CD SEM Hitachi S-9260A и S-9380, установке УФ-задубливания фоторезиста Axcelis Gemini GPS, Gemini GES для ПХ-зачистки, SCREEN FC821L ЖХТ $SiO_2$. Удаление фоторезиста жидкостным способом проводилось на установке TEL ZETA [2].

В работе использовался фоторезист JSR M35G h = 12625 Å, проявитель TMA238. Маску контролировали на SEM, задубливали при T = 120 °C, t = 70 с. ПХ-зачистка проводилась при следующих условиях: $O_2/N_2H_2$ = 1100/200 $см^3$/мин, t = 20 с, T = 80 °C. ЖХТ $SiO_2$ проводилось в буферном травителе $NH_4F$: HF: $H_2O$ = 7:1:20 (об. ч), T = 22 °C, t = 132 с, удаление фоторезиста в $H_2SO_4$ : $H_2O_2$ = 1 : 4 (об. ч.), T = 95 °C, t = 600 с, контроль на CD SEM.

Исследования показали, что для обеспечения ΔCD между фотолитографией и травлением не более чем 0,1 мкм необходимо соблюдать следующие условия: ΔE < 5 %, для CD по маске фоторезиста необходимо учитывать клин проявления, ПХ-зачистка в предварительно охлажденной камере. Установка Hitachi S-9260A не обеспечивает необходимый контраст изображения на маске фоторезиста, что приводит к ошибкам в выборе элемента контроля.

По результатам исследований можно сделать следующие основные выводы. 1. Рабочие параметры процесса фотолитографии (доза облучения E и глубина фокуса F) должны быть зафиксированы и составлять: E = 23+1,15 (мДж/см$^2$), F = 0,1 мкм. 2. Показано, что модель установки CDSEM Hitachi S-9260A не обладает достаточной контрастностью, в то время как модель CDSEM Hitachi S-9380 обладает высокой контрастностью и, соответственно, правильно определяет необходимый элемент измерения. 3. Контроль линейных размеров на установке CD SEM Hitachi S-9380 по маске фоторезиста должен проводиться с использованием функции SLOPE, учитывающей угол наклона профиля фоторезиста к подложке — клин проявления (по результатам экспериментов CD = 0,49+0,02 (мкм), клин = 80 + 20 (нм)). 4. Операции задубливания фоторезиста, жидкостного химического травления оксида и жидкостного снятия фоторезиста, проводимые в стандартных режимах, не вносят существенный вклад в изменение линейных размеров. 5. Показано, что ПХ-зачистка должна проводиться на охлажденной не менее 30 минут камере перед началом процесса.

***Литература***

1. Ранчин С. О., Кирюшина И. В. Свойства буферного травителя оксида кремния и особенности использования в технологии интегральных схем // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — Вып. 1 (165). — С. 38–43.
2. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.

УДК 621.3.019.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.227.228

# Использование методов статистического прогнозирования деградации параметров схемы для оценки показателей надежности

## Using Methods for Statistical Prediction of Circuit Parameters Degradation to Assess Reliability Indicators

**Соловьев А. В., к. т. н., Селецкий А. В., к. т. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*andsolovev@niime.ru*

**Solovev A. V., Ph.D, Seletskiy A. V., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*andsolovev@niime.ru*

В работе рассмотрена методика расчета показателей надежности при ускоренных испытаниях изделий посредством анализа деградации их параметров — критериев годности. Приведены основные результаты использования метода трендов при испытаниях на безотказность и сохраняемость.
**Ключевые слова:** надежность ЭКБ; интенсивность отказов; гамма-процентный ресурс; расчетно-экспериментальный метод оценки надежности; метод трендов.

The work examines the methodology of predicting the reliability in accelerated testing of integrated circuits by analyzing the degradation of their most important electrical parameters. The main results of using the trend method when checking reliability and safety have been presented.
**Keywords:** reliability of electronic components; failure rate; calculation-experimental method of reliability assessment; trend method.

Для выявления необходимых параметров надежности применяются специальные методики измерений. Для экономии человеческих и технических ресурсов и получения достоверных результатов в методиках расчета надежности применяются законы теории вероятностей и математической статистики [1–3].

Испытания на безотказность (УИБ) проводятся по ГОСТ РВ 20.57.414 методом ускоренных испытаний с применением метода статистического прогнозирования изменения во времени параметров изделий в целях оценки показателей надежности [4–5].

Ускоренные испытания на сохраняемость (УИС) проводятся на одной выборке в следующей последовательности:

- имитация процесса хранения изделий в условиях отапливаемых хранилищ;
- имитация процесса хранения изделий под навесом с последующей имитацией суточных перепадов температуры путем воздействия циклических температурных нагрузок [6].

В конце испытаний на сохраняемость проводят кратковременные испытания изделий на безотказность в объеме, заданном в нормативных документах.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы.

Метод трендов не оценивает вероятность случайных отказов, поэтому используется для определения показателей надежности микросхемы в период стабильной работы. Случайные отказы на этапах «ранней смерти» и старения не учитываются в расчетах.

В связи с завышенными нормами на параметры и малыми экспериментальными значениями рассчитанные значения превышают требования ТЗ в несколько раз. При снижении норм на критический параметр в два раза гамма-процентная наработка до отказа ($T\gamma$) снизится в четыре раза, а гамма-процентный срок сохраняемости ($Tc\gamma$) — в два–семь раз в зависимости от условий хранения.

При УИБ критическим параметром является выходное напряжение низкого уровня (статический параметр).

При УИС критичным параметром с точки зрения деградации является:

- для условий отапливаемого хранилища — входной ток низкого уровня;
- для условий хранения под навесом — выходное напряжение низкого уровня.

При проведении УИС термоциклирование не дало существенного вклада в итоговое значение скорости деградации тренда параметров.

Однако при испытаниях в отапливаемом хранилище параметры, связанные с напряжением высокого и никого уровня и временем переключения, не проявили тенденцию к деградации. При испытаниях под навесом параметры, связанные с напряжением высокого и низкого уровня, начали деградировать в отличие от испытаний в отапливаемом хранилище.

После УИС проведены кратковременные испытания на безотказность. Испытания показали, что скорость деградации параметров коррелирует с УИБ, проведенными ранее на другой выборке. Проведенные ранее испытания на сохраняемость не оказали существенного влияния на скорость деградации параметров.

***Литература***

1. Смирнов С. В. Методы исследования надежности наногетероструктурных монолитных интегральных схем. — Томск: ТУСУР, 2010. — 98 с.
2. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — 800 с.
3. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
4. Лонцих П. А., Елисеев С. В. Трендовое прогнозирование и контроль систем качества // Системы. Методы. Технологии, 2012. — № 4. — С. 29–35.
5. ГОСТ РВ 20.57.414-97. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям к надежности.
6. Синельников Ю. Г., Корчагин А. И., Ирихова Н. П., Невский А. А. О возможном сокращении объема испытаний при подтверждении требований сохраняемости изделий ЭКБ на этапе разработки // Сборник докладов II Межведомственной межотраслевой научно-практической конференции «Обеспечение качества и соответствия изделий ЭКБ. СМК предприятий и подготовка специалистов», 2020. — № 1168. — С. 336–343.

УДК 621.372.412 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.229.231

# Многослойная энергетическая реакционная нанофольга Ni/Al для соединения термочувствительных электронных компонентов

## Multilayer Energy Reaction Ni/Al Reaction Nanofoil for Connecting Heat Sensitive Electronic Components

**Корж И. А., к. т. н., Чуклин В. А.**
*АО «ОНИИП»*
*644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231*
*crystal@oniip.ru*

**Korzh I. A., Ph.D, Chuklin V. A.**
*ONIIP JSC*
*231 Maslennikova St., Omsk, 644009, Russia*
*crystal@oniip.ru*

В АО «ОНИИП» разработана технология изготовления многослойной энергетической реакционной нанофольги для соединений электронных компонентов, обладающая значительными преимуществами по сравнению с традиционными методами, такими как сварка и пайка.
**Ключевые слова:** нанофольга; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; соединение компонентов; безгазовое горение.

Нанофольга Ni/Al — фольга, состоящая из тысяч нанослоев алюминия (Al) и никеля (Ni), которые реагируют экзотермально, когда подается импульс энергии (рис. 1).

**Рис. 1.** Вспышка нанофольги при инициировании током от зондов

Активируясь, фольга создает и поддерживает реакцию, она действует как быстрый и управляемый, ограниченный по области воздействия источник высокой температуры (реакция сопровождается выделением большого количества тепла), который расплавляет прилегающие слои припоя, соединяя компоненты вместе. При этом не возникает необходимости нагревать всю сборку для осуществления процесса пайки, что позволяет соединять компоненты с различными КТР без возникновения существенных термомеханических напряжений. Процесс соединения может применяться в любых задачах, где соединение осуществляется с помощью припоев.

В АО «ОНИИП» [1, 2] разработана технология изготовления нанофольги с параметрами, не уступающими параметрам нанофольги NanoFoil INDIUM Corp. (США). Температура горения — 1300–1500 °С, скорость распространения фронта горения — 2–5 м/с, толщина нанофольги — от 40 мкм до 60 мкм, размер — 100×150 мм, энергия горения — 1100–1200 Дж/г.

Энергетическая реакционная фольга Ni/Al с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для технологии соединений электронных компонентов обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными способами, такими как сварка (различные виды) и пайка:

- пайка при комнатной температуре;
- пайка, которая не требует нагрева всего изделия;
- пайка в течение долей секунд;
- пайка без необходимости создания специальной атмосферы (в том числе в вакууме и в воде);
- высокая прочность, низкое термическое сопротивление, низкое электрическое сопротивление (сопротивление 40 Ом·см);
- равномерная толщина линии склеивания (40 мкм);
- ограниченное тепловое воздействие;
- не требуются печи для отверждения или оплавления; легкость соединения;
- можно использовать после завершения оплавления пассивных компонентов;
- не содержит свинца, соответствует требованиям RoHS;
- подходит для автоматизированной сборки.

Процесс пайки при помощи нанофольги состоит из следующих этапов (рис. 2). Вырезанная под нужную форму фольга аккуратно помещается между двумя поверхностями, которые нужно соединить при помощи пайки. Если спаиваемые поверхности не покрыты припоем, то необходимо использовать припой для пайки в виде преформы или фольги. Спаиваемые поверхности должны быть плоскими, ровными, параллельными и чистыми. Когда спаиваемые поверхности предварительно покрыты припоем, желательно удалить с поверхностей оксидную пленку механически или химически. Для обеспечения полного и качественного смачивания спаиваемых поверхностей важно точно совместить преформы из припоя, фольгу и спаиваемые поверхности. Также необходимо приложить давление на компоненты: это позволит расплавленному припою равномерно распределиться и полностью смочить спаиваемые поверхности. Фольга Ni/Al активируется локальным небольшим импульсом энергии, который может быть создан практически любым источником энергии: оптическим, электрическим или термальным. Воздействие энергетического импульса на фольгу порождает химическую реакцию, сопровождающуюся выделением необходимого количества тепловой энергии для расплавления припоя и пайки. После прохождения химической реакции в месте пайки остается соединение Al/Ni, перемешанное с припоем.

Области применения нанофольги: пайка деталей, которые не допускают нагрева при их соединении; присоединение МЭМС-приборов к основанию корпуса, присоединение кристаллов светодиодов к теплопроводным подложкам и т. п.; использование в качестве энергетического воспламенителя и др. При этом для горения фольги не требуется кислород (она воспламеняется в вакууме, воде и т. п.).

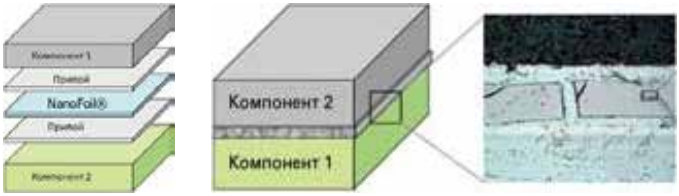



**Рис. 2.** Технология формирования паяного соединения с использованием нанофольги Ni/Al

***Литература***

1. Корж И. А. Многослойные реакционные нанопленки Ni/Al с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в технологии микроэлектроники // Техника радиосвязи, 2020. — № 2. — С. 71–79.
2. Корж И. А. Реакционные многослойные пленки Ni/Al — новое направление в технологии соединения радиокомпонентов // Материалы V111 Всерос. научн.-техн. конф. — Омск, 11 авг. 2020, 117–124. DOI: 10.25206/978-5-8149-3074-3-117-124.

УДК 621.3.049.774 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.232.234

# Учет свойств материалов при монтаже кристалла как важный фактор эффективности отведения тепла от микросборки

## Recognition of Material Properties During Die Attachment as an Important Factor in the Efficiency of Heat Dissipation from a Microassembly

**Кадыров В. Н.**
*ООО «НПП «ПРИМА»*
*603950, г. Нижний Новгород, Сормовское ш., 1Ж*
*kadyrov-vn@prima.nnov.ru*

**Kadyrov V. N.**
*PRIMA RPE LLC*
*1Zh Sormovskoye Hwy., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*
*kadyrov-vn@prima.nnov.ru*

Выполнены обзор и анализ методов монтажа кристаллов, физических свойств поверхностей и соединительных материалов. Выделены перспективные решения с точки зрения теплопроводности. Продемонстрирован пример технологии сборки модуля с усилителем мощности, обозначена роль импортных материалов.
**Ключевые слова:** монтаж кристаллов; теплопроводность; температурный коэффициент расширения.

This article outlines description and analysis of methods for die assembly, physical aspects of surfaces and connecting materials, as well as innovative solutions in terms of thermal conductivity. In addition, it gives an example of assembling technology of module with a power amplifier. The role of the import materials has also been defined by the author.
**Keywords:** die assembly; thermal conductivity; expansion ratio.

Тенденция миниатюризации и увеличения мощности, а значит, и тепловыделения полупроводниковых приборов заставляет разработчика и технолога тщательно подходить к выбору материалов и конструктиву, особенно в изделиях, ограниченных по весу, объему и энергопотреблению. Функциональная надежность полупроводниковых приборов во многом определяется теплоэлектрическим состоянием, на которое влияет стадия присоединения кристалла к основанию и последующие стадии сборки, отвечающие за передачу тепла.

Правильный подбор материалов конструкции, согласование их свойств и соединение между собой позволяют уменьшить влияние переходных тепловых сопротивлений в процессе теплопередачи. За правильным подбором элементов конструкции должно следовать пристальное внимание к состоянию паяного или клеевого шва. Наличие в паяном или клеевом шве пузырей воздуха и других включений может приводить к локальному перегреву термически нагруженных компонентов модуля с дальнейшим выходом его из строя [1, 2]. Существуют различные способы монтажа кристаллов на подложку [3, 4]: пайка твердыми припоями, пайка эвтектическими сплавами, приклеивание токопроводящими клеями

на органической основе, присоединение с помощью технологии спекания. Каждый из способов призван обеспечивать отвод тепла, высокую механическую прочность соединения, малое сопротивление контакта.

В статье на основании проведенного обзора выделены наиболее перспективные решения для монтажа мощных микросхем, возможность своевременного отвода тепла от которых является важным аспектом для достижения высоких характеристик. Отмечены соответствующие перспективным решениям импортные материалы, не имеющие аналогов на внутреннем рынке и создающие риски при разработке перспективных микросборок с мощными микросхемами. Приведен пример технологии сборки модуля с использованием импортных материалов, позволяющих обеспечить отвод тепла 10 Вт/мм$^2$.

***Литература***

1. Колпаков А. Новые технологии силовой электроники // Компоненты и технологии, 2007. — № 5.
2. Колпаков А. Новые технологии расширяют горизонты силовой электроники // Компоненты и технологии, 2007. — № 4.
3. Алиев Ш. Д., Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А. Современные технологические методы контроля пайки // Сб. тезисов докл. XXIV итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 21–24 апр., 2003. — Махачкала: ДГТУ, 2003. — С. 87.
4. Исмаилов Т. А., Алиев Ш. Д., Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А. Контроль качества посадки кристалла на основание корпуса // Измерение, контроль, информатизация: Сб. тр. Междунар. НТК: АГТУ, 2004. — С. 55–56.

Miniaturization trend and power amplification, and hence the heat release of semiconductors, forces the designer and product engineer to carefully approach the choice of materials and design, especially in products limited in weight, volume and energy consumption. Functional reliability of semiconductors is largely determined by the thermoelectric state, which is influenced by the die attach to a substrate and the subsequent assembly, which is responsible for heat transfer.

Correct selection of materials of the assembly, coordination of their properties and bonding allows reducing the effect of transient thermal resistance during heat-transfer process. The correct selection of structural elements shall be followed by focused attention to the state of the soldered or glued seam.

The presence of air bubbles and other inclusions in the soldered or glue seam may lead to local overheating of thermally stressed components of the module with its further failure [1, 2]. There are various methods of die bonding [3, 4]: hard soldering, eutectic bonding, gluing with conductive organic adhesives, bonding using sintering technology. Each method is aimed at providing heat dissipation, high mechanical reliability of the assembly, and low contact resistance.

Based on the review, the article highlights the most promising solutions for mounting powerful microcircuits, whereas the possibility of timely heat dissipation from the circuits is an important aspect to achieve high properties. The article notes the import materials corresponding to promising solutions that have no analogues in the domestic market and create risks in the development of promising microassemblies with powerful microcircuits.

The article introduces an example of a module assembly technology using import materials, which allow heat dissipation of 10 W/mm$^2$ to be provided.

***References***

1. Kolpakov A. Novye tekhnologii silovoj elektroniki / Komponenty i tekhnologii, 2007. № 5.
2. Kolpakov A. Novye tekhnologii rasshiryayut gorizonty silovoj elektroniki / Komponenty i tekhnologii, 2007. № 4.
3. Aliev Sh. D., Shahmaeva A. R., Shangereeva B. A. Sovremennye tekhnologicheskie metody kontrolya pajki // Sb. tezisov dokl. HKHIV itogovoj nauch.-tekhn. konf. prepodavatelej, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU, 21–24 apr., 2003. Mahachkala: DGTU, 2003. P. 87.
4. Ismailov T. A., Aliev Sh. D., Shahmaeva A. R., Shangereeva B. A. Kontrol' kachestva posadki kristalla na osnovanie korpusa // Izmerenie, kontrol', informatizaciya: Sb.tr. Mezhdunar. NTK: AGTU, 2004. P. 55–56.

УДК 544.22 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.235.237

# Электропроводящие сети на основе углеродных нанотрубок и оксида графена, сформированные лазером

## Laser-formed Electrical Conductive Networks Based on Carbon Nanotubes and Graphene Oxide

**Куксин А. В.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*nix007@mail.ru*
*[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)*
*119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*
*gerasimenko@bms.zone*

**Kuksin A. V.[1], Gerasimenko A. Yu.[1,2]**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*nix007@mail.ru*
*[2] I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)*
*8/2 Trubetzkaya St., Moscow, 119991, Russia*
*gerasimenko@bms.zone*

Разработана технология формирования электропроводящих трехмерных сетей из многостенных углеродных нанотрубок и восстановленного оксида графена на кремниевой подложке. Сети формировались в результате наносварки частиц оксида графена и нанотрубок под действием лазерного излучения. Исследованы структурные характеристики, твердость и электропроводность полученных сетей.
**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки; графен; лазер; электропроводящие сети.

The paper presents a technology for the formation of electrically conductive three-dimensional networks of multi-walled carbon nanotubes and reduced graphene oxide on a silicon substrate. The networks were formed as a result of nanowelding of graphene oxide particles and nanotubes under the action of laser radiation. The structural characteristics, hardness and electrical conductivity of the resulting networks have been investigated.
**Keywords:** carbon nanotubes; graphene; laser; electrically conductive networks.

В настоящее время интенсивно растет число областей применения таких углеродных материалов, как углеродные нанотрубки (УНТ) и графен. Углеродные нанотрубки считаются перспективными функциональными добавками для улучшения характеристик пьезорезистивных элементов, преобразователей солнечной энергии, аккумуляторов. Не менее перспективным наноматериалом для электроники является графен. Он применяется при создании перспективных конденсаторов, аэрогелей и сенсоров. Наибольший интерес представляют гибридные материалы, которые включают в себя УНТ и листы графена / оксида графена из-за

дополняющих друг друга структурных и электрофизических особенностей двух модификаций наноуглерода.

Свойства подобных гетероструктур УНТ/графен были исследованы ранее [1]. Основным методом создания таких гибридных структур является выращивание УНТ на листах графена [2]. Улучшенные проводящие свойства массивов УНТ, выращенных на слое графена, обусловлены ненасыщенными π-связями краевых атомов УНТ, что приводит к образованию более сильных связей с атомами в слое графена.

Данная работа выполнялась в целях разработки нового метода формирования трехмерных сетей из УНТ и оксида графена под действием лазерного излучения. В результате обработки сканирующим воздействием наносекундного лазера получен эффект наносварки УНТ с листами графена. Диапазон плотностей лазерной энергии составил 0,14–0,8 Дж/см$^2$. Была исследована структура полученных сетей двумя методами. Изображения сканирующей электронной микроскопии и результаты спектроскопии комбинационного рассеяния подтверждают формирование сетей из УНТ и оксида графена при пороговой плотности энергии излучения 0,3 Дж/см$^2$. Из-за повышения плотности энергии излучения выше порогового значения происходило образование аморфного углерода на поверхности УНТ в виде нановключений.

Исследована твердость полученных сетей. Максимальная твердость после воздействия лазером с плотностью энергии 0,3 Дж/см$^2$ достигала 52,7 ГПа.

Электропроводность гибридных наноструктур превышала электропроводность нанотрубок, поскольку УНТ играли роль электропроводящих мостиков. Максимальная удельная электропроводность после лазерного воздействия составляла ~$22.6 \cdot 10^6$ См/м.

Сети из УНТ и графена могут быть применены для формирования прочных электропроводящих межсоединений в наноэлектронике, а также создания компонентов гибкой электроники и биоэлектроники. С помощью созданных гибридных материалов из УНТ и листов графена также могут разрабатываться такие перспективные устройства, как интеллектуальные носимые устройства (IWD).

***Литература***

1. Fan Z., Yan J., Zhi L., Zhang Q., Wei T., Feng J., Zhang M., Qian W., Wei F. A Three-Dimensional Carbon Nanotube/Graphene Sandwich and Its Application as Electrode in Supercapacitors // Advanced Materials, 2010. № 22. P. 3723–3728.
2. Du F., Yu D., Dai L., Ganguli S., Varshney V., Roy A. K. Preparation of Tunable 3D Pillared Carbon Nanotube–Graphene Networks for High-Performance Capacitance // Chemistry of Materials, 2011. № 23. P. 4810–4816.

Currently, the number of applications for carbon materials such as carbon nanotubes (CNTs) and graphene is rapidly growing. Carbon nanotubes are considered promising functional additives for improving the characteristics of piezoresistive elements, solar energy converters, and batteries. Graphene is no less promising nanomaterial for electronics. It is used to create promising capacitors, aerogels, and sensors. Of greatest interest are hybrid materials, which include CNTs and graphene / graphene oxide sheets due to the complementary structural and electrophysical features of the two nanocarbon modifications.

The properties of such CNT/graphene heterostructures were studied earlier [1]. The main method for creating such hybrid structures is growing CNTs on graphene sheets [2]. The improved conducting properties of CNT arrays grown on a graphene layer are due to unsaturated π-bonds of edge CNT atoms, which leads to the formation of stronger bonds with atoms in the graphene layer.

This work has been carried out with the aim of developing a new method for the formation of three-dimensional networks of CNTs and graphene oxide under the action of laser radiation. As a result of processing by the scanning action of a nanosecond laser, the effect of nanowelding CNTs with graphene sheets has been obtained. The range of laser energy densities was 0.14–0.8 J/cm$^2$. The structure of the obtained networks was investigated by two methods. Scanning electron microscopy images and the results of Raman spectroscopy have confirmed the formation of networks of CNTs and graphene oxide at a threshold radiation energy density of 0.3 J/cm$^2$. An increase in the radiation energy density above the threshold value resulted in the formation of amorphous carbon on the CNT surface in the form of nanoinclusions.

The hardness of the obtained nets has been investigated. The maximum hardness after exposure to a laser with an energy density of 0.3 J/cm$^2$ reached 52.7 GPa.

The electrical conductivity of hybrid nanostructures exceeded the electrical conductivity of nanotubes, since CNTs played the role of electrically conductive bridges. The maximum electrical conductivity after laser exposure was ~$22.6 \cdot 10^6$ S/m.

CNT and graphene networks can be used to form strong electrically conductive interconnections in nanoelectronics, as well as to create flexible electronics and bioelectronic components. The created hybrid materials from CNTs and graphene sheets can also be used to develop such promising devices as intelligent wearable devices (IWD).

***References***

1. Fan Z., Yan J., Zhi L., Zhang Q., Wei T., Feng J., Zhang M., Qian W., Wei F. A Three-Dimensional Carbon Nanotube/Graphene Sandwich and Its Application as Electrode in Supercapacitors // Advanced Materials, 2010. № 22. P. 3723–3728.
2. Du F., Yu D., Dai L., Ganguli S., Varshney V., Roy A. K. Preparation of Tunable 3D Pillared Carbon Nanotube–Graphene Networks for High-Performance Capacitance // Chemistry of Materials, 2011. № 23. P. 4810–4816.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.238.239

# К вопросу о влиянии нейтронного облучения на характеристики мощных высокочастотных p-i-n-диодов на основе GaAs

## To the Question of the Neutron Irradiation Effect on the Characteristics of High-power High-frequency GaAs p-i-n Diodes

**Солдатенков Ф. Ю.[1], Козлов В. А.[1,2], Соболев М. М.[1]**
*[1] ФТИ им. А. Ф. Иоффе*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*[2] АО «ПК «ФИД-Техника»*
*194223, г. Санкт-Петербург, пр. Тореза, 68, лит. В*
*kozlov@fidtech.com*

**Soldatenkov F. Y.[1], Kozlov V. A.[1,2], Sobolev M. M.[1]**
*[1] Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia*
*[2] "FID-Tekhnika" JSC*
*lit. B, 68 Toreza Ave., St. Petersburg, 194223*
*kozlov@fidtech.com*

Исследовано влияние облучения нейтронами на динамические характеристики мощных GaAs p-i-n-структур и их вольт-амперные характеристики. Установлено, что структуры, выращенные в атмосфере аргона, обладают более высокой радиационной стойкостью в сравнении со структурами, выращенными в атмосфере водорода.
**Ключевые слова:** арсенид галлия; жидкофазная эпитаксия; нейтронное облучение; силовые импульсные диоды.

The report highlights the effect of neutron irradiation on the dynamic characteristics of high-power GaAs p-i-n diodes and their current-voltage characteristics. Diode structures grown in an argon ambient have a higher radiation resistance than structures grown in a hydrogen ambient.
**Keywords:** gallium arsenide; liquid phase epitaxy; neutron irradiation; pulsed power devices.

В работе исследовались GaAs p-i-n-диоды с высоковольтными (от 100 до 1000 В) плавными $p^0$-i-$n^0$-переходами, полученными модифицированным методом жидкофазной эпитаксии [1] в атмосфере водорода или аргона.

Установлено, что облучение нейтронами с энергией ~1,0 МэВ и дозами (флюенсами) $(2{,}9–16)\cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ приводит к уменьшению значений времени «обратного» восстановления блокирующей способности диодов от исходных (100–150) нс до уровня менее 10 нс при многократном снижении амплитудных значений тока обратного восстановления. Общее уменьшение заряда обратного восстановления диодов после облучения составило 50–100 раз, причем переключение облученных диодов из проводящего состояния в блокирующее носило мягкий характер. Обнаружено, что структуры, выращенные в атмосфере аргона, обладали значительно

более высокой радиационной стойкостью в сравнении с аналогами, выращенными в атмосфере водорода.

В работе выполнены исследования DLTS-спектров облученных GaAs p-i-n-структур и представлена интерпретация полученных результатов.

***Литература***

1. Defect engineering for carrier lifetime control in high voltage GaAs power diodes / Kozlov V.A. et al. // Proc. of 25th Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC-2014) (Saratoga Springs, USA, 19–21 May 2014), 2014. P. 139–144.

We have studied GaAs p-i-n diodes with high-voltage (from 100 V to 1000 V) grade $p^0$-i-$n^0$- junctions obtained by a modified liquid-phase epitaxy [1] in a hydrogen or argon ambient.

It was found that irradiation with neutrons with an energy ~1,0 MeV and doses (fluences) $(2.9–16) \cdot 10^{13}$ $cm^{-2}$ leads to a decrease in the reverse recovery times of diodes from the initial (100–150) ns to a level of less than 10 ns with a multiple reduction in the amplitude values of the reverse recovery current. The total reduction of the reverse recovery charge in irradiated structures was between (50–100) times, wherein the nature of reverse switching of the irradiated diodes from the conductive state to the blocking state was soft.

Structures grown in an argon atmosphere were found to have significantly higher radiation resistance compared to one grown in a hydrogen atmosphere.

DLTS-spectra of irradiated GaAs p-i-n structures were measured and interpretation of the results obtained was presented.

***References***

1. Defect engineering for carrier lifetime control in high voltage GaAs power diodes / Kozlov V.A. et al. // Proc. of 25th Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC-2014) (Saratoga Springs, USA, 19–21 May 2014). 2014. P. 139–144.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.240.241

# Оборудование для сборки чипов полупроводниковых приборов методом низкотемпературного спекания наночастиц серебра

## Equipment for Semiconductor Chip Assembly via Process of Low Temperature Silver Nanoparticle Sintering

**Козлов В. А., Калашников С. А., Гладышев В. Э.**
*АО «ПК «ФИД-Техника»*
*194223, г. Санкт-Петербург, пр. Тореза., 68, лит. В*
*kozlov@fidtech.com*

**Kozlov V. A., Kalashnikov S. A., Gladyshev V. E.**
*PK "FID-Tekhnika" JSC*
*Lit. B, 68 Toreza Ave., St. Petersburg, 194223*
*kozlov@fidtech.com*

В работе описаны конструкция и характеристики установки монтажа полупроводниковых кристаллов на контактные площадки с использованием метода низкотемпературного спекания наночастиц серебра.
**Ключевые слова:** монтаж полупроводниковых кристаллов; наночастицы; технология низкотемпературного спекания; тепловое сопротивление; термоциклирование.

The work considers the design and parameters of the installation for the assembly of semiconductor chips on contact sites using the method of low-temperature silver nanoparticle sintering.
**Keywords:** semiconductor crystal assembly; nanoparticles; low temperature sintering technology; thermal resistance; thermal cycling.

Одним из наиболее перспективных сегодня методов монтажа полупроводниковых чипов на контактные площадки является метод их присоединения с применением технологии низкотемпературного спекания частиц серебра. Данный метод был предложен Гербертом Шварцбауэром более 30 лет тому назад [1], однако его широкое применение началось только с 2010-х годов. Современные варианты этой технологии с применением наночастиц Ag обеспечивают очень высокий уровень эксплуатационных характеристик и надежности полупроводниковых приборов за счет минимизации электрического и теплового сопротивления соединения, синтезированного из Ag, высокой стойкости этого соединения к термоциклированию и его способности сохранять характеристики вплоть до температур в 500 градусов Цельсия.

При всех отмеченных выше достоинствах данная технология сборки приборов пока практически не используется на предприятиях электронной отрасти России, несмотря на доступность материалов и широкое использование этого метода за рубежом. Основной причиной такой ситуации, по нашему мнению, является отсутствие отечественного оборудования, пригодного для практического освоения процессов монтажа кристаллов с использованием спекания частиц Ag.

В связи с вышеизложенным, в компании АО «ПК «ФИД-Техника» был спроектирован и изготовлен собственный вариант подобной установки (рис. 1*а*) для

отработки на ней групповой сборки чипов силовых приборов с использованием метода спекания наночастиц Ag.

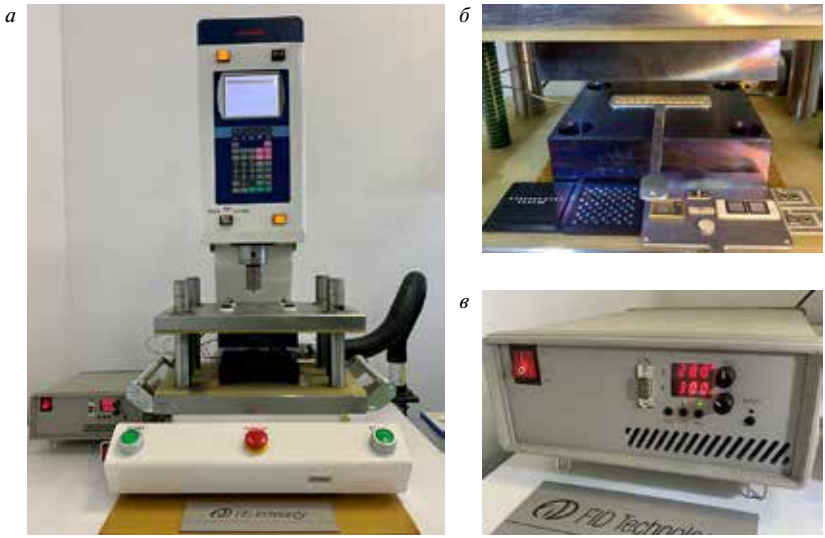


**Рис. 1.** Установка: *а*) общий вид установки, *б*) термоплиты, *в*) блок питания нагревателей

Установка отличается простотой, однако обладает при этом высокой точностью задания таких важнейших параметров процесса спекания, как давление, температура и время процесса. Высокая точность установки обусловлена использованием в качестве ее основного рабочего узла японского электрического пресса Janome. Пресс имеет следующие характеристики.

- давление: от 10 до 1000 кг с точностью установки в 100 гр.;
- время прессования: от 5 до 1000 сек.;
- скорость движения штока: от 0,01 до 100 мм/сек.

Термический узел установки изготовлен из элементов штамповых блоков компании Proplastica и обеспечивает плоско-параллельное перемещение термоплит (рис. 1*б*) относительно друг друга. Силовой блок управления трубчатыми нагревателями (рис. 1*в*) в термоплитах, изготовленный в АО «ПК «ФИД-Техника», позволяет осуществлять раздельный нагрев каждой из термоплит до температур от 50 до 300 °C.

Авторы считают, что новым в данной работе является изготовление и апробация первого отечественного лабораторного образца специального оборудования для сборки кристаллов с применением технологии спекания наночастиц серебра и проведения НИОКР.

***Литература***

1. Schwarzbauer H. and Kuhnert R. Novel Large Area Joining Technique for Improved Power Device Performance // IEEE Transactions on Industry Applications. 1991. Vol. 27. P. 93–95.

УДК 538.935 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.242.244

# Дрейфовая скорость электронов в гетероструктурах AlGaAs / InGaAs / GaAs донорно-акцепторным легированием и сверхрешеточными спейсерами

## The Drift Velocity of Electrons in AlGaAs/InGaAs/GaAs Heterostructures with Donor-acceptor Doping and Superlattice Spacers

**Протасов Д. Ю.[1,2], к. ф.-м. н., Бакаров А. К.[1], к. ф.-м. н., Журавлев К. С.[1,3], д. ф.-м. н.**
*[1] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*
*protasov@isp.nsc.ru*
*[2] Новосибирский государственный технический университет*
*630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20*
*[3] Новосибирский государственный университет*
*630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

**Protasov D. Yu.[1,2], Ph.D, Bakarov A. K.[1], Ph.D, Zhuravlev K. S.[1,3], Sc.D**
*[1] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*
*protasov@isp.nsc.ru*
*[2] Novosibirsk State Technical University*
*20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia*
*[3] Novosibirsk State University*
*2 Pirogov St., Novosibirsk, 630090, Russia*

Концентрация двумерного электронного газа в гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs с донорно-акцепторным легированием увеличена до $4{,}9 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$, для повышения подвижности использованы сверхрешеточные спейсеры. Измеренная величина насыщенной скорости дрейфа составляет $1{,}0 \cdot 10^7$ см/с для напряженности электрического поля 9,3 кВ/см, что в 1,2–1,3 раза превышает насыщенную скорость дрейфа в обычных гетероструктурах pHEMT.
**Ключевые слова:** pHEMT; донорно-акцепторное легирование; дрейфовая скорость.

The concentration of two-dimensional electron gas in AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructures with donor-acceptor doping was increased to $4.9 \cdot 10^{12}$ cm$^{-2}$. The superlattice spacers were used to boost the mobility. The measured value of the saturated drift velocity is $1.0 \cdot 10^7$ cm/s for an electric field strength of 9.3 kV/cm, which is 1.2–1.3 times higher than the saturated drift velocity in ordinary pHEMT heterostructures.
**Keywords:** pHEMT; donor-acceptor doping; drift velocity.

Гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с донорно-акцепторным легированием (donor-acceptor doped pseudomorphic high electron mobility transistor — DA-pHEMT) [1] позволили существенно (на 3–5 дБ) увеличить коэффициент усиления СВЧ-транзисторов, изготовленных на основе этих гетероструктур [2]. Для повышения проводимости канала транзистора концентрация двумерного электронного

газа (ДЭГ) была увеличена до $5 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$, а рассеяние на ионизированных центрах было уменьшено при помощи сверхрешеточного спейсера, состоящего из трех-четырех периодов сверхрешетки AlAs/GaAs. В работе приводятся результаты измерений дрейфовой скорости в таких гетероструктурах.

Гетероструктура DA-pHEMT для исследований была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии с концентрацией ДЭГ $4{,}9 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ и подвижностью 5700 см$^2$В$^{-1}$с$^{-1}$. Параллельная проводимость по области доноров не наблюдалась. Для измерений полевых зависимостей дрейфовой скорости методом фотолитографии были изготовлены прямоугольные мезаструктуры, состоящие из набора двух параллельных омических контактов Ge/Au/Ni/Au, промежуток между которыми имел размер 50×200 мкм.

Полевые зависимости дрейфовой скорости ДЭГ были измерены методом проводимости при приложении коротких (30 наносекунд) импульсов напряжения с частотой следования 1 Гц. Форма и амплитуда импульсов напряжения и тока контролировались с помощью четырехканального цифрового осциллографа Tektronix TDS 3034 с шириной полосы 300 МГц. Дрейфовая скорость электронов определялась в предположении, что концентрация ДЭГ не изменяется в электрическом поле. В этом случае полевая зависимость дрейфовой скорости рассчитывалась как $v_{dr}(E) = I(E)/qn_s w$, где $w$ — ширина образца. Было получено, что величина насыщенной скорости дрейфа составляет $1{,}0 \cdot 10^7$ см/с для напряженности электрического поля 9,3 кВ/см, что в 1,2–1,3 раза превышает насыщенную скорость дрейфа в гетероструктурах pHEMT без донорно-акцепторного легирования [3].

***Литература***


1. Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С., Торопов А. И. и др. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов // Письма в ЖТФ, 2012. — Т. 38. — № 17. — С. 84–89.
2. Богданов С. А., Бакаров А. К., Журавлев К. С., Лапин В. Г. и др. Полевой транзистор миллиметрового диапазона длин волн на основе псевдоморфной гетероструктуры с дополнительными потенциальными барьерами // Письма в ЖТФ, 2021. — Т. 47. — № 7. — С. 52–54.
3. Протасов Д. Ю., Гуляев Д. В., Бакаров А. К., Торопов А. И. и др. Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в pHEMT-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Письма в ЖТФ, 2018. — Т. 44. — № 6. — С. 77–84.


AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructures with donor-acceptor doped pseudomorphic high electron mobility transistor (DA-pHEMT) [1] made it possible to significantly (by 3–5 dB) increase the gain of microwave transistors based on these heterostructures [2]. To increase the conductivity of the transistor channel, the concentration of two-dimensional electron gas (2DEG) was increased to $5 \cdot 10^{12}$ cm$^{-2}$, and scattering from ionized centers was reduced using a superlattice spacer consisting of three to four periods of the AlAs/GaAs superlattice. The paper presents the results of measurements of the drift velocity in such heterostructures.

The DA-pHEMT heterostructure for studies was grown by molecular beam epitaxy with a 2DEG concentration of $4.9 \cdot 10^{12}$ $cm^{-2}$ and a mobility of 5700 $cm^2V^{-1}s^{-1}$. Parallel conduction over the donor region was not observed. To measure the field dependences of the drift velocity by photolithography, rectangular mesa structures were fabricated, consisting of a set of two parallel Ge/Au/Ni/Au ohmic contacts, the gap between them being $50 \times 200$ μm in size.

The field dependences of the 2DEG drift velocity were measured by the conduction method with the application of short (30 nanosecond) voltage pulses with a repetition rate of 1 Hz. The shape and amplitude of the voltage and current pulses were monitored using a Tektronix TDS 3034 four-channel digital oscilloscope with a 300 MHz bandwidth. The drift velocity of electrons was determined under the assumption that the 2DEG concentration does not change in an electric field. In this case the field dependence of drift velocity was calculated as $v_{dr}(E) = I(E)/qn_sw$, where $w$ is the sample width. It was found that the value of the saturated drift rate is $1.0 \cdot 10^7$ cm/s for an electric field strength of 9.3 kV/cm, which is 1.2–1.3 times higher than the saturated drift rate in pHEMT heterostructures without donor-acceptor doping [3].

***References***

1. Lukashin V. M., Pashkovskii A. B., Zhuravlev K. S., Toropov A. I. et al. Decreasing the role of transverse spatial electron transport and increasing the output power of heterostructure field-effect transistors. Tech. Phys. Lett., 2012. V. 38. Iss. 9. P. 819–821.
2. Bogdanov S. A., Bakarov A. K., Zhuravlev K. S., Lapin V. G. et al. Millimeter-wave field-effect transistor based on pseudomorphic heterostructure with additional potential barriers. Technical Physics Letters, 2021. Vol. 47. № 7. P. 52–54. (In Russian).
3. Protasov D. Yu., Gulyaev D. V., Bakarov A. K., Toropov A. I. et al. Increasing Saturated Electron-Drift Velocity in Donor-Acceptor Doped pHEMT Heterostructures. Tech. Phys. Lett., 2018. V. 44. Iss. 3. P. 260–262.

УДК 621.3.049.7 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.245.246

# Топологические особенности транзисторного резервирования элементов ПЛИС

## Topological Features of FPGA Elements Transistor Redundancy

**Никитин М. С.[1,2], Тюрин С. Ф.[2,3]**
*[1] ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»*
*614990, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106*
*root@pnppk.ru*
*[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
*614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29*
*[3] Пермский государственный национальный исследовательский университет*
*614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15*

**Nikitin M. S.[1,2], Tyurin S. F.[2,3]**
*[1] "Perm Scientific and Production Instrument-making Company" PJSC*
*106, 25 October St., Perm, 614990, Russia*
*root@pnppk.ru*
*[2] Perm National Research Polytechnic University*
*29 Komsomolsky Ave., Perm, Russia, 614990*
*[3] Perm State University*
*15 Bukireva St., Perm, 614990*

Разработка высоконадежных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, FPGA) является одной из актуальных задач современной интегральной технологии. Такие ПЛИС необходимы для цифровой аппаратуры критического назначения. Одним из методов обеспечения высокой надежности является введение избыточности, в том числе на уровне транзисторов. В статье исследуется так называемое расчетверение транзисторов в логическом элементе с использованием топологического моделирования в системе Microwind.
**Ключевые слова:** транзисторное резервирование; логический элемент; FPGA.

The development of highly reliable programmable logic integrated circuits (FPGA) is one of the urgent tasks of modern integrated technology. Such FPGAs are necessary for critical digital equipment. One of the methods of ensuring high reliability is the introduction of redundancy, including at the transistor level. The paper examines the so-called four-splitting of transistors in a logic element using topological modeling in the Microwind system.
**Keywords:** transistor redundancy; logic element; FPGA.

Обеспечение надежности цифровой аппаратуры информационно-измерительных и управляющих систем может быть достигнуто путем введения структурной избыточности, использования контроля и диагностики. Резервирование увеличивает стоимость аппаратуры, потребляемую мощность, но в ряде областей применения без него невозможно построить аппаратуру, работающую в сложных условиях эксплуатации. Надежность ПЛИС постоянно увеличивается, однако резервирование продолжает оставаться одним из важнейших методов достижения

требуемой вероятности безотказной работы. Кроме резервирования каналов для парирования отказов транзисторов в последнее время в русле перехода к наноэлектронике активно исследуется резервирование на транзисторном уровне. При так называемом расчетверении отказ одного любого транзистора из четверки транзисторов не приводит к изменению логической функции, однако ухудшает помехоустойчивость и быстродействие.

В работе доказывается, что комбинирование топологических структур такого резервирования позволяет варьировать электрические характеристики элемента с введенной избыточностью при сохранении реализуемой логической функции.

***Литература***

1. Tyurin S. F. Fault Tolerant Voter (Conference Paper) // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, November, 2018. P. 163–168. DOI: 10.1109.
2. Grekov A. V., Tyurin S. F. Fault tolerant logic cell FPGA // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. P. 287–290.
3. ГОСТ 27.002.5-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. — Москва: Изд-во стандартов, 2016. — 28 с.

Reliability of digital equipment of information-measuring and control systems can be achieved by introducing structural redundancy, using monitoring and diagnostics. Redundancy increases the cost of equipment, power consumption, but in a number of applications it is impossible to build equipment that works in difficult operating conditions without it. The reliability of FPGAs is constantly increasing, but redundancy continues to be one of the most important methods to achieve the required probability of uptime. In addition to reserving channels for fending off transistor failures, recently, in the course of the transition to nanoelectronics, redundancy at the transistor level has been actively studied. With the so-called four-splitting of transistors, the failure of any one transistor out of the four transistors does not lead to a change in the logical function, but it worsens noise immunity and performance.

The research has revealed that the combination of topological structures of such redundancy allows you to vary the electrical characteristics of an element with the introduced redundancy while maintaining the implemented logical function.

***References***

1. Tyurin S. F. Fault Tolerant Voter (Conference Paper). 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, November, 2018. P. 163–168. DOI: 10.1109.
2. Grekov A. V., Tyurin S. F. Fault tolerant logic cell FPGA. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. P. 287–290.
3. GOST 27.002.5-2015. Reliability in technology (SSNT). Terms and definitions. — Moscow, Publishing House of Standards, 2016. 28 p.

УДК 544.032 + 544.227 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.247.249

# Роль поверхности в технологии микро- и наноэлектроники

## The Role of the Surface in Micro- and Nanoelectronics Technology

**Бокарев В. П., д. т. н., Красников Г. Я., д. т. н., академик РАН**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*vbokarev@niime.ru*

**Bokarev V. P., Sc.D, Krasnikov G. Ya., Sc.D, Academician of RAS**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*vbokarev@niime.ru*

Рассмотрено влияние поверхности на физические и химические свойства материалов. На примерах ряда технологических операций показано определяющее влияние физико-химических свойств поверхностей контактирующих материалов на результат воздействия и его анизотропию.
**Ключевые слова:** поверхность; технология; микроэлектроника; наноэлектроника.

The paper considers the effect of the surface on the physical and chemical properties of materials. The examples of a number of technological operations have shown the decisive influence of the physicochemical properties of the surfaces of contacting materials on the result of exposure and on its anisotropy.
**Keywords:** surface; technology; microelectronics; nanoelectronics.

Основной термодинамической характеристикой поверхности является величина удельной поверхностной энергии, т. е. той энергии, которая поглощается (выделяется) при образовании (уничтожении) единицы поверхности кристалла. Ее влияние на свойства кристаллов наиболее наглядно проявляется в размерной зависимости свойств наноразмерных веществ. Поверхностная энергия определяет свойства поверхности, имеющие огромное значение в технологических процессах изготовления интегральных микросхем (ИС), различных микроэлектромеханических устройств (МЭМС) и в химической технологии. Рассмотрим результаты влияния поверхностной энергии на ряд технологических операций.

### *1. Жидкостное травление монокристаллического кремния*

Учет анизотропии поверхностных свойств кристалла в технологии микроэлектроники давно применяется в процессах жидкостного химического травления поверхностей монокристаллического кремния в щелочных травителях [1], в которых скорость травления поверхности (100) превышает скорость травления (111) на два порядка, что используется при создании различных канавочных структур.

### *2. Окисление поверхности монокристаллического кремния*

К настоящему времени экспериментально изучены и промоделированы процессы, происходящие на границе раздела фаз $Si–SiO_2$ при оксидировании поверхности кремния. Изучение процессов окисления кремния показало, что в зависимости от температуры процесса и толщины выращенного на его поверхности диоксида максимальная скорость окисления соответствует либо поверхности (111), либо (110) [2–5].

***3. Процесс криогенной очистки кремниевых пластин***

В технологии микроэлектроники для очистки поверхности от органических и неорганических веществ используется высокоэффективная жидкостная очистка [6]. Во многих случаях жидкостную очистку можно заменить на сухую очистку химически инертными реактивами путем обработки поверхности пластин струей микрочастиц инертного газа при температуре, близкой к температуре их кристаллизации. Такая очистка объясняется внедрением криоаэрозоля на границу раздела двух твердых тел, обладающих на порядок большей величиной поверхностной энергии по сравнению с жидкостью, что приводит к ослаблению энергии связи частиц с поверхностью пластин [7–9].

***4. Процесс высокотемпературной стабилизации свойств фоторезистивных масок***

Изготовление фоторезистивной маски (ФРМ) является одной из основных многократно повторяющихся операций при изготовлении интегральных схем, а воспроизводимость ее маскирующих свойств, в том числе размеров и профиля, является залогом успешного проведения всех последующих процессов изготовления ИС. Для этого необходимо, чтобы термическая стойкость и фиксированные размеры ФРМ сохранялись до температур, превышающих 150 °С, что достигается применением специальных фоторезистов или задубливанием фоторезиста химическими и физическими методами [9, 10]. К наиболее технологичным способам задубливания относится обработка ФРМ ультрафиолетовым излучением с одновременной термической обработкой. При этом происходят процессы полимеризации поверхностного слоя фоторезиста с последующей объемной полимеризацией, что приводит к стабилизации профиля и увеличению адгезии ФРМ к подслою.

***5. Поверхностное плавление кристаллов и контактное плавление технологических слоев***

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что плавление кристалла начинается на его поверхности при температуре, меньшей температуры плавления [9]. Подобные процессы происходят и на границе раздела двух разных твердых фаз, способных образовывать между собой эвтектику [10]. Контактное плавление в микроэлектронике наглядно проявляется в явлении пурпурной чумы, когда при разогреве контакта золотого проводника с алюминиевой разводкой до температуры 350 °С происходит разрушение контакта из-за образования эвтектического сплава $AuAl_2$.

Подобным явлением можно объяснить и электромиграцию в системе Si—Al, приводящую к разрушению алюминиевых дорожек, нанесенных на оксидированную поверхность кремниевой пластины, при плотности тока более 105 А/см$^2$ [10].

***6. Анизотропия работы выхода и работы адгезии***

Рассмотрим связь анизотропии поверхностной энергии с анизотропией работы выхода электрона и работы адгезии на примере созданной модели координационного плавления кристалла (МКП). Работа выхода электронов на разных гранях кристалла определяет эмиссионные свойства данного материала, а также влияет на активность металлических катализаторов. Поэтому данному вопросу посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [11–16].

Проблема адгезии пленок относится к ключевым проблемам в технологии микро- и наноэлектроники, а также в технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [17]. В работе [10] с применением разработанной модели координационного

плавления кристаллов (МКП) проанализированы экспериментальные данные и модельные расчеты физико-химических свойств поверхности кристаллов. Было показано, что модель координационного плавления кристалла подтверждает связь кристаллической структуры веществ с анизотропией физико-химических свойств их поверхности [10]. С использованием МКП были рассчитаны величины удельных поверхностных энергий элементарных веществ, анизотропия удельной поверхностной энергии и температура поверхностного плавления металлов, анизотропия работы выхода электрона и работы адгезии монокристаллических веществ. Проведенные расчеты подтвердили связь максимальных величин работы выхода электрона и работы адгезии с максимальными значениями удельных поверхностных энергий этих граней кристалла [18–21].

***Литература***


1. Технология СБИС: в 2 кн. Под ред. С. Зи; Кн. 1. — М.: Мир, 1986. — 404 с.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В. // Физика и техника полупроводников, 2003. — № 1. — С. 44–49.
3. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В. // Поверхность, 2003. — № 2. — С. 98–104.
4. Александров О. В., Дусь А. И. // Физика и техника полупроводников, 2009. — Т. 43. — Вып. 10. — С. 1413–1418.
5. Ogata S., Ohno S., Tanaka M., Mori T., Horikawa T., Yasuda T. // Applied Physics Letters, 2011. V. 98. P. 092906.
6. Бокарев В. П., Горнев Е. С., Кирюшина И. В., Ранчин С. О., Трусов А. А. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 1 (157). — С. 25–32.
7. Hoenig S. A. // Compressed Air Magazine. August 1986. P. 22–24.
8. Бокарев В. П., Красников Г. Я. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 58–62.
9. Бокарев В. П. Поверхность и физико-химические свойства кристаллов. — М.: МФТИ, 2018. — 146 с.
10. Бокарев В. П. Развитие физико-химических принципов оценки влияния поверхностной энергии на свойства материалов и процессы для технологии микроэлектроники: диссертация д. т. н. — Москва: «МИЭТ», 2020. — 299 с.
11. Skriver H. L., Rosengaard N. M. // Phys. Rev. B. 1992. V. 46. № 11. P. 7157–7168.
12. Wang Jian, Wang Shao-Qing // Surface Science. 2014. V. 630. P. 216–224.
13. Владимиров А. Ф. // Поверхность, 1999. — № 9. — С. 58–66.
14. Бокарев В. П., Красников Г. Я. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 4 (164). — С. 25–30.
15. de Boer F. R., Boom R., Mattens W. C. M., Miedema A. R., Niessen A. K. Cohesion in Metals. North-Holland, Amsterdam, 1988. 758 p.
16. Michaelson H. B. // J. Appl. Phys, 1977. V. 48. P. 4729–4733.
17. Бокарев В. П. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 2 (162). — С. 56–59.
18. Бокарев В. П., Красников Г. Я., Горнев Е. С. // Наноиндустрия, 2019. — № S89. — С. 175–179.
19. Мельников В. В., Еремеев С. В., Кулькова С. Е. // ЖТФ, 2011. — Т. 81. — Вып. 10. — С. 114–121.
20. Plummer E. W., Rhodin H. // J. Chem. Phys., 1968. V. 49. P. 3479–3496.
21. Bokarev V. P., Krasnikov G. Ya. // Surface Science, 2018. V. 668. P. 73–79.

УДК 621.3.087.92 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.250.252

# Перспективы развития технологии 3D-микросборок для аппаратуры космического применения

## 3D SIP Technology-prospects for Creating Space Electronic Devices

**Новоселов А. Ю.**
*АО «ПКК Миландр»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5*
*novoselov@ic-design.ru*

**Novoselov A. Y.**
*ICC Milandr JSC*
*5 Georgievski Ave., Zelenograd, Moscow, 124498*
*novoselov@ic-design.ru*

Рассмотрены параметры и конструктивные особенности систем в корпусе, разработанных на основе технологии 3D-монтажа, — схем памяти для аппаратуры космического применения. Предложены структура и схемотехника микросборки бортового компьютера на основе конструктива и технологии гибридного монтажа 3D-структур и отдельных кристаллов, включая CPLD (Complex Programmable Logic Device). Рассмотрен альтернативный принцип конструирования ячейки памяти, специализированной для применения в CPLD-микросхемах. Показаны результаты проектирования CPLD средней емкости для приборов космического применения. В качестве ключевой технологической базы использовался техпроцесс SOI 180 нм HV, 3D-структуры созданы с использованием TSV (Through-silicon via) интерпозеров (Interposer).
**Ключевые слова:** система в корпусе; ПЛИС; «кремний на изоляторе» (КНИ); радиационная стойкость.

The paper considers parameters and design features of the systems in package developed on the basis of 3D mounting technology — memory circuits for space equipment. Besides it offers the structure and schematic of a SIP of an on-board computer based on the design and technology of hybrid assembly of 3D structures and separate dices, including CPLD (Complex Programmable Logic Device). The SOI 180 nm HV process technology was used as a key technological base, 3D structures were created using TSV (Through-silicon via) interposer.
**Keywords:** system in package; CPLD; isolating capacitor; silicon-on-insulator; radiation hardness.

Рассмотрены параметры и конструктивные особенности разрабатываемых серий 3D-микросборок:

9023РР018 флеш-памяти объемом 128 Мбит с организацией 4Мх32;

9022РТ018 радиационно стойкой однократно программируемой памяти объемом 5 Мбит с организацией 128Кх40;

9022РА018 радиационно стойкой памяти ОЗУ объемом 20 Мбит с организацией 1Мх40.

Конструктивно данные 3D-сборки идентичны и применяется технология стека с использованием кремниевой переходной пластины (interposer). Данное решение позволяет использовать серийно изготавливаемые кристаллы памяти с межкристальной коммутацией по двум слоям металлизации интерпозера. Таким образом, появляется возможность 3D-интеграции.

Пассивные компоненты согласования и фильтрации, как правило, устанавливаются на плате, хотя имеется возможность их монтажа на интерпозере при адекватных размерах и количестве. В рамках представленной работы были созданы конструктивы из кристаллов одного размера. Однако данная технология допускает и применение разноразмерных кристаллов. Несомненно, при проектировании подобного рода устройств необходимо уделять внимание теплорассеиванию. В нашем случае максимально нагружена по теплу сборка 9022РА018 с током потребления до 600 мА, что соответствует 3 Вт мощности. Расчеты показали уверенный отвод тепла в плату.

Учитывая запараллеленность шин адреса, применение входных шинных формирователей рекомендуемо.

Принимая во внимание современные требования по проектированию аппаратуры, в т.ч. аспекты миниатюризации при определенной степени унификации схемотехнических решений, можно считать применение ПЛИС в аппаратуре космического приборостроения довольно актуальным, как, впрочем, и в других приборостроительных направлениях. Однако внешняя среда функционирования накладывает довольно противоречивые требования. Так, например, для высокоорбитальных КА несомненно требуются определенный универсализм и миниатюризация, которые предлагают приборы с программируемой логикой, но и требования по стойкости к спецфакторам тоже присутствуют. Т.е. применение элементов с зарядовым принципом хранения информации — довольно сомнительное решение.

Определенным компромиссом является гибридный принцип хранения информации, т.е. использование ячеек SRAM, запараллеленных по функционированию с OTP-ячейками типа antifuse. На рис. 1 представлено такое решение.

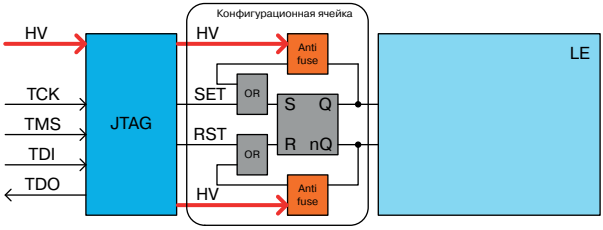



**Рис. 1.** Функциональная схема аналогового изолирующего интерфейса

Логика работы такого устройства следующая: на этапе отладки программист использует микросхему как классическую ПЛИС с загружаемой конфигурацией, т.е. используются ячейки SRAM. После окончательной отладки ПЛИС вводится в режим «прожига» и отработанная конфигурация «зашивается» в память OTP, при этом ячейки SRAM выводятся из использования. Микросхема сконфигурирована

и начинает функционировать спустя определенное время после включения питания, не требуя дополнительной конфигурации.

На схеме рис. 1 представлена функциональная схема гибридной OTP-SRAM-ячейки с соответствующими интерфейсами.

Микросборки и микросхема ПЛИС выполнены на 180-нм КМОП КНИ-технологии, что позволило существенно уменьшить влияние паразитных емкостей на подложку изолирующих конденсаторов, повысить помехоустойчивость и устойчивость к воздействию факторов космического пространства.

***Литература***

1. Data Sheet, DS2316 Datasheet 40MX and 42MX FPGA https://www.microsemi.com.
2. Data Sheet, 3DSR4M08VS1264 512kx8 https://www.3d-plus.com.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.253.255

# Возможности и перспективы контрактной разработки и производства на российской полупроводниковой фабрике конкурентоспособной ЭКБ кремниевой СВЧ электроники для систем связи, радиолокации, радиочастотной идентификации, навигации

## Opportunities and Prospects for Contract Development and Production on the Russian Semiconductor Factory of the Competitive ECB Silicon SHF-electronics for Communication Systems, Radar, Radio Frequency Identification, and Navigation

**Сотсков Д. И.[1,2], Бабак Л. И.[3], д. т. н., Панасенко П. В.[4], д. т. н., Елесин В. В.[1,2], к. т. н., Усачев Н. А.[1,2], к. т. н., Кузнецов А. Г.[1,2], Котов В. Н.[1,2], Селецкий А. В.[4], к. т. н., Шелепин Н. А.[4], д. т. н.**

*[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*[2] АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*disot@spels.ru*
*[3] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*
*[4] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Sotskov D. I.[1,2], Babak L. I.[3], Sc.D, Panasenko P. V.[4], Sc.D, Yelesin V. V.[1,2], Ph.D, Usachev N. A.[1,2], Ph.D, Kuznetsov A. G.[1,2], Kotov V. N.[1,2], Seletskiy A. V.[4], Ph.D, Shelepin N. A.[4], Sc.D**

*[1] National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*[2] "Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*disot@spels.ru*
*[3] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR University)*
*40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia*
*[4] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

Представлен задел кооперации предприятий в разработке ЭКБ твердотельной СВЧ электроники на российской кремниевой фабрике — элементов и функциональных блоков приемо-передающих БИС до 15 ГГц. Рассмотрены перспективы контрактного производства конкурентоспособной ЭКБ для систем связи, радиолокации, радиочастотной идентификации, навигации.

**Ключевые слова:** технологический процесс; КМОП; сверхвысокая частота; функциональный блок; характеризация.

Электронная компонентная база (ЭКБ) твердотельной СВЧ электроники (ТСВЧЭ) формирует ядро радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) систем связи и передачи данных (LTE, 5G, Wi-Fi, Bluetooth, VSAT и др.), радиолокации, радиочастотной идентификации, навигации. Наряду с ИС малой степени интеграции (усилители, переключатели сигналов, смесители, генераторы и др.) номенклатуру современной серийной ЭКБ, выпускаемой ведущими зарубежными компаниями (Qualcomm Tech., Analog Dev., Texas Instruments, Infineon Tech., NXP Semi. и др.), составляют приемо-передающие БИС классов «система в корпусе» и «система на кристалле» с частотами от 0,4 до 100 ГГц, изготовленные по технологиям на кремнии (КМОП/КМОП КНИ 180–28 нм, SiGe БиКМОП 0,42–0,09 мкм), арсениде галлия (GaAs pHEMT 0,5–0,1 мкм, GaAs HBT 2–1 мкм), нитриде галлия (GaN HEMT 0,5–0,1 мкм).

Нормативные требования, сжатые сроки, санкционные ограничения и дефицит мощностей полупроводниковых фабрик создают серьезные трудности при производстве конкурентоспособной гражданской, экстремальной и доверенной ЭКБ ТСВЧЭ силами средних и малых дизайн-центров, входят в противоречие с необходимостью снижения цены изделий, увеличения тиражности. В подобных условиях обеспечение контрактной разработки и производства на отечественных полупроводниковых фабриках является одной из приоритетных задач развития электронной промышленности РФ.

В докладе представлен задел кооперации предприятий в проектировании ЭКБ твердотельной СВЧ электроники на российской кремниевой фабрике [1–5].

В результате характеризации технологических процессов (ТП) КМОП / КМОП КНИ 180 нм показан потенциал создания приемо-передающих БИС для систем связи, радиочастотной идентификации и навигации, представлены функциональные блоки (ФБ) усилителей, смесителей, переключателей, генераторов с рабочими частотами до 3 ГГц категории РС1, РС2.

В ходе комплекса инициативных работ по характеризации ТП КМОП 90 нм проведена оценка частоты единичного усиления ($f_T$) базового элемента — МОП-транзистора (МОПТ) — не менее 100 ГГц, установлено отсутствие катастрофических параметрических отказов и малая чувствительность МОПТ к импульсному (до $3{,}9 \cdot 10^{12}$ ед./с) и дозовому (до $3 \cdot 10^6$ ед.) воздействиям ионизирующего излучения. Представлен комплект диаграммообразующих ФБ для приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона категорий РС2, РС3.

Сформулированы предложения по комплексу НИОКР для подготовки к контрактной разработке и производству на отечественной полупроводниковой фабрике конкурентоспособной ЭКБ кремниевой СВЧ электроники по ТП КМОП / КМОП КНИ 90 и 65 нм.

***Литература***

1. Елесин В. В., Сотсков Д. И., Усачев Н. А. и др. Радиационно-ориентированная и СВЧ-характеризация техпроцессов контрактного производства ЭКБ ТСВЧЭ, используемых отечественными ДЦ: состояние, проблемы и ближайшие задачи // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — С. 423–425.
2. Бабак Л. И., Красников Г. Я., Панасенко П. В. и др. Тенденции развития радиочастотных КМОП, КНИ и SiGe БиКМОП-технологий ИС для СВЧ-приемопередатчиков // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — С. 396–397.

3. Елесин В. В., Усачев Н. А., Назарова Г. Н. и др. Возможности разработки радиочастотных приемо-передающих БИС космического применения по отечественной технологии КМОП КНИ 0,18 мкм // Известия вузов. Электроника, 2017. — № 6 (22). — С. 546–558.
4. Усачев Н. А., Елесин В. В., Сотсков Д. И. и др. Библиотека элементов и функциональные блоки для создания приемопередающих БИС космического назначения по отечественной КМОП КНИ технологии 180 нм // Наноиндустрия, 2017. — № S (74). — С. 472–474.
5. Бабак Л. И., Панасенко П. В., Коколов А. А. и др. Комплект диаграммообразующих СВЧ ИС для приемопередающих модулей X-диапазона с АФАР на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — С. 421–422.

УДК 621.382-213 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.256.258

# Исследование влияния режимов нанесения диэлектрических пленок $SiN_x$ на свойства ДЭГ гетероструктур AlGaN/GaN

## Research on the Influence of $SiN_x$ Film Deposition Regimes on the Properties of 2DEG in AlGaN/GaN Heterostructures

**Жильников И. А., Миннебаев С. В., Сейдман Л. А., Черных А. В.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*

**Zhilnikov I. A., Minnebaev S. V., Seidman L. A., Chernykh A. V.**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*

В данной работе было проведено исследование влияния соотношений потоков азота и моносилана в процессе осаждения пленок $SiN_x$ методом ICP-CVD на электрофизические параметры структуры SiN / AlGaN / GaN. Исследованы процессы дополнительной плазменной обработки поверхности гетероэпитаксиальной структуры AlGaN/GaN непосредственно перед нанесением пассивирующего покрытия, а также рассмотрена возможность модификации свойств структуры за счет подачи ВЧ-смещения на подложку во время проведения процесса осаждения.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрическая поляризация; гетероструктура AlGaN/GaN; ICP-CVD-осаждение $SiN_x$; двумерный электронный газ (ДЭГ); вольт-фарадная характеристика.

The paper highlights the influence of the ratios of $N_2$ and $SiH_4$ fluxes during the deposition of SiNx films by ICP-CVD on the electrophysical parameters of the SiN / AlGaN / GaN structure. The processes of additional plasma treatment of the surface of the AlGaN/GaN heteroepitaxial structure directly before passivation deposition have been investigated. The possibility of modifying the properties of the structure by applying RF displacement to the substrate during the deposition process has also been considered.

**Keywords:** piezoelectric polarization; AlGaN/GaN heterostructure; ICP-CVD SiNx deposition; 2DEG; C-V curves.

В качестве исходных образцов использовались гетероструктуры AlGaN/GaN диаметром 52 мм, выращенные методом MOCVD на сапфировых подложках с толщиной слоя AlGaN 20–25 нм и мольным содержанием Al 0,26–0,28. Перед загрузкой в камеру гетероструктуры подвергали обработке 90 сек. в струе диметила, имеющей температуру 80 °C и формируемой под давлением 80 атм. с последующей обработкой в течение 30 сек. струей изопропилового спирта при температуре 30 °C, далее осуществлялась сушка образцов в азоте. Оценка толщины образующихся пленок диэлектрика и их коэффициента преломления проводилась на контрольных кремниевых спутниках, которые проходили аналогичный процесс плазмохимической обработки. Измерения толщины пленки и коэффициента преломления проводились в пяти точках эллипсометром L1165300 фирмы Gartner с длиной волны лазера

632,8 нм. Разброс толщины по спутнику не превышал 0,11 % и коэффициента преломления — 0,03 %.

Емкостные измерения проводились на установке Semiconductor Measurement System MDC CSM/Win, C-V-характеристики измерялись на частотах f = 1 МГц и 10 кГц. Характеристики снимались при планарном расположении зондов с помощью ртутного зонда — 0,005 $см^{-2}$, второй контактный зонд имел кольцевую форму, его площадь в 38 раз превышала площадь измерительного зонда. Для оценки гистерезиса и восстановления величины емкости C-V-характеристики снимались в разных диапазонах управляющего напряжения. Параллельно снимались I-V-характеристики при различных скоростях развертки (с периодом от 0,1 до 0,9 сек.). Измерения C-V-характеристик проводились с использованием последовательной (Cs—Rs) схемы замещения. Концентрация носителей тока в 2DEG определялась двумя методами: по оценке вихревых ВЧ-токов при неразрушающих бесконтактных измерениях на установке LEI-1600 Mobility Systems (на $см^{-2}$) и из C-V-характеристик ($\Delta C/\Delta V$) в $см^{-3}$, при этом также определялось положение по глубине структуры пика концентрации свободных носителей, т. е. глубина 2DEG. Концентрация и глубина определялись из C-V-характеристик как для структур диэлектрик/AlGaN/GaN, так и для гетероструктур AlGaN/GaN после удаления химическим путем пленки диэлектрика.

В результате C-V- и I-V-измерений структур SiNx / AlGaN / GaN, сформированных методами плазмохимического осаждения при различных технологических вариантах процесса, показано, что:

- у структур с пленкой $SiN_x$ с содержанием азота 60 % и кремния 40 % или обогащенных кислородом (5–8 %) наблюдается появление на I-V-кривых характерных пульсаций тока утечки. Экспериментально показано, что параметры наблюдаемых осцилляций определяются, в частности, особенностями воздействия плазмы на поверхность гетероструктуры; даны возможные объяснения причин появления характерных пульсаций;
- с помощью дополнительного непосредственного воздействия азотной плазмы разной продолжительности на поверхность гетероструктур AlGaN/GaN можно управлять величиной и знаком фиксированного заряда в системе SiNx / AlGaN / GaN и изменять концентрацию свободных носителей в канале двумерного газа в системе AlGaN/GaN.

The initial wafers were AlGaN/GaN heterostructures with a diameter of 2" grown by the MOCVD method on sapphire substrates with an AlGaN layer thickness of 20–25 nm and Al molar content 0.26–0.28. Before loading into the chamber, the heterostructures were treated for 90 sec in 80 °C — DMF jet under a pressure of 80 atm, followed by treatment for 30 sec with a jet of IPA at room temperature; then the samples were dried in nitrogen-flow. The thickness of the resulting dielectric films and their refractive index were estimated on control silicon wafers that underwent a similar process of plasma chemical treatment. Measurements of the film thickness and refractive index were carried out at five points with a Gartner ellipsometer L1165300 with a laser wavelength of 632,8 nm. The thickness spread over the satellite did not exceed 0.11 % and the refractive index — 0.03 %.

Capacitive measurements were carried out on the installation of the Semiconductor Measurement System MDC CSM/Win, C-V characteristics were measured at frequencies

f = 1 MHz and 10 kHz. The characteristics were taken with a planar arrangement of the probes using a mercury probe — 0,005 $cm^{-2}$, the second contact probe had an annular shape, its area is 38 times larger than the area of the measuring probe. To evaluate the hysteresis and restore the capacitance value C-V, the characteristics were taken in different ranges of the control voltage. In parallel, I-V characteristics were taken at different scanning speeds (with a period from 0.1 sec to 0.9 sec). Measurements of C-V characteristics were carried out using a serial (Cs — Rs) substitution scheme. The concentration of current carriers in 2DEG was determined by two methods: by estimating eddy RF currents during non-destructive non-contact measurements at the LEI-1600 Mobility Systems installation (at $cm^{-2}$) and from C-V characteristics ($\Delta C/\Delta V$) in $cm^{-3}$, while the position of the peak concentration of free carriers, i. e. the depth of 2DEG, was also determined by the depth of the structure. The concentration and depth were determined by the C-V characteristics, both for dielectric/AlGaN/GaN structures and for AlGaN/GaN heterostructures after chemical removal of the dielectric film.

As a result of C-V and I-V measurements of $SiN_x$/AlGaN/GaN structures formed by plasma chemical deposition methods for various technological variants of the process, it has been shown that:

- structures with a SiNx film with a nitrogen content of 60 % and silicon content of 40 % or enriched with oxygen (5–8 %) have characteristic ripples of the leakage current on the I-V curves. It has been experimentally shown that the parameters of the observed oscillations are determined, in particular, by the peculiarities of the plasma effect on the surface of the heterostructure; possible explanations of the causes of the appearance of characteristic pulsations have been given.
- with the help of additional direct exposure to nitrogen plasma of different durations of the surface of AlGaN/GaN heterostructures, it is possible to control the value and sign of a fixed charge in the $SiN_x$/AlGaN/GaN system and change the concentration of free carriers in the two-dimensional gas channel in the AlGaN/GaN system.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.259.260

# Контроллер накристальной NOR флеш-памяти с параллельным доступом

## On-chip NOR Flash Memory Controller with Parallel Access

**Ворсин А. Г., Ивасюк Е. В.**
*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*
*vorsin@cs.niisi.ras.ru, ivasyuk@cs.niisi.ras.ru*

**Vorsin A. G., Ivasiuk E. V.**
*SRISA RAS*
*bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218*

Использование накристальной энергонезависимой памяти позволяет упростить конечное устройство и повысить безопасность данных. Представлена архитектура и поведенческая модель контроллера накристальной NOR флеш-памяти. Описана верификация контроллера путем функционального моделирования.
**Ключевые слова:** NOR; флеш; поведенческая модель; контроллер.

The use of on-chip non-volatile memory provides the device simplicity and increases data security. The paper presents the architecture and behavioral model of the controller of the on-chip NOR flash memory. The verification of the controller by functional modeling has been described.
**Keywords:** NOR; flash; behavioral model; controller.

Использование постоянных запоминающих устройств на основе транзисторов с ловушкой заряда (CTF) [1], называемых также флеш-памятью, является актуальным решением для повышения защищенности данных в промышленных электронных изделиях. Преимущество в скорости записи и чтения перед дисковыми накопителями для ряда применений перекрывает недостаток в виде меньшего количества циклов перезаписи [2]. При условии относительно небольшого объема хранящихся данных актуальным становится создание энергонезависимых элементов памяти. Преимуществом накристальной памяти является возможность хранения загрузочного кода и данных инфраструктуры безопасности в корпусе центральный вычислительной СБИС модуля без использования отдельной внешней микросхемы на плате.

При размещении флеш-памяти на кристалле наиболее подходящей будет NOR-архитектура. Это обусловлено тем, что ввиду требуемого небольшого объема памяти (2 МБ) малая плотность расположения ячеек не критична, а доступ отдельным байтам при операциях чтения, напротив, вкупе с высокоскоростными интерфейсами передачи данных [3] обеспечит достаточное быстродействие всей системы. Данная архитектура хотя и имеет большую площадь ячеек памяти относительно NAND, но из-за более простого устройства, наличия возможности произвольного байтового доступа и непосредственного исполнения кода (XIP) не требует дополнительных аппаратных средств подготовки данных [4].

Однако блок флеш-памяти нельзя напрямую подключить к интерфейсу процессора из-за его асинхронной работы и необходимости выдерживать временные интервалы во время операций чтения, программирования (записи) и очистки. Это приводит к необходимости создания дополнительного контроллера, обеспечивающего взаимодействие памяти с процессором.

В ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН в рамках разработки собственной библиотеки логических и физических СФ-блоков для промышленных микроконтроллеров появилась потребность в контроллере, обеспечивающем взаимодействие памяти с процессором в энергонезависимых накопителях данных систем на кристалле. В связи с этим был разработан контроллер накристальной флеш-памяти с параллельным доступом.

Контроллер разработан в виде логического СФ-блока — поведенческой модели. Его архитектура, помимо основной возможности взаимодействия с памятью на чтение, запись и очистку, также обеспечивает:

- защиту доступа к основным операциям с помощью набора двоичных ключей;
- защиту доступа к информационному блоку памяти с помощью ключей;
- защиту адресного пространства основного блока памяти от записи с точностью до четырех адресов;
- параллельный доступ сразу к двум блокам памяти.

Последняя особенность позволяет повысить скорость обмена данными за счет использования шины данных с большей пропускной способностью, чем у памяти, не меняя ее структуры.

Работоспособность контроллера была проверена с помощью функционального моделирования в тестовом окружении Verilog-функций, имитирующих запросы ведущего устройства.

***Литература***

1. Tehrani S., Pak J., Randolph M., Sun Y., Haddad S., Maayan E., Betser Y. Advancement in Charge-Trap Flash memory technology // 5th IEEE International Memory Workshop, IMW 2013, art. № 6582082.
2. Simona B., Peter D. Write Endurance in Flash Drives: Measurements and Analysis, Northeastern University, 2010.
3. AMBA AXI and ACE Protocol Specification.
4. Betty P., David P. Memories for the Intelligent Internet of Things, John Wiley & Sons Ltd, 2018.

УДК 621.3.087.92 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.261.262

# Разработка серии микросборок приемо-передатчиков с гальванической развязкой

## Developing Set of Galvanic Isolated Transceivers

**Агрич Ю. В., Макаров А. Б., Павлюк Ю. М., Сухотерин Е. В., Тучин А. В.**
*АО «ПКК Миландр»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5*
*agrich.yu@milandr.ru*

**Agrich Y. V., Makarov A. B., Pavlyuk Y. M., Suchoterin E. V., Tuchin A. V.**
*ICC Milandr JSC*
*5 Georgievski Ave., Zelenograd, Moscow, 124498*
*agrich.yu@milandr.ru*

Рассмотрены параметры и конструктивные особенности разрабатываемой серии микросборок приемо-передатчиков цифровой и аналоговой информации с гальванической развязкой. В качестве изолятора использованы конденсаторы, размещенные в кристаллах передатчика и приемника, что позволило существенно снизить чувствительность к внешнему магнитному полю и токовым импульсам.
**Ключевые слова:** приемо-передатчик; гальваническая развязка; изолирующий конденсатор; широтно-импульсная модуляция (ШИМ); калибровка.

The paper considers constructive and technology features and parameters of a galvanic isolated digital and analog transceivers set. Capacitors built in transceiver and receiver chips are used for galvanic isolation, which allows reducing external current and magnetic field sensitivity.
**Keywords:** transceiver; galvanic isolation; isolating capacitor; pulse-width modulation; calibration.

Рассмотрены параметры и конструктивные особенности разрабатываемых серий микросборок приемо-передатчиков цифровой и аналоговой информации с гальванической развязкой:

- МСБ 2011ВВ045 (055) — 2-канальные и МСБ 2011ВВ065 (075, 085) — 4-канальные приемо-передатчики цифровой информации с гальванической развязкой;
- МСБ 2011УХ015 — усилитель ошибки с гальванической развязкой.

В отличие от аналогичных цифровых приемо-передатчиков фирмы Analog Devices — ADuM1200 (1201), ADuM2400 (2401, 2402), ADuM3440 (3441, 3442) [1], и усилителя ошибки с гальванической развязкой ADuM3190 [2] вместо изолирующего трансформатора использованы конденсаторы, размещенные в кристаллах передатчика и приемника, что позволило существенно снизить чувствительность к внешним токам магнитных полей.

Изолирующие конденсаторы емкостью по 0,26 пФ на дифференциальных выходах кристалла передатчика и входах кристалла приемника, выполненные между 1 и 6 металлами, обеспечивают изоляцию не менее 2000 В.

Поскольку конденсаторы передают только фронты сигналов, для повышения помехоустойчивости передается дифференциальный сигнал, модулируемый частотой 400 МГц.

Цифровые приемо-передатчики с КМОП/LVDS-интерфейсами (МСБ 2011ВВ045 ... 2011ВВ085) при напряжении питания 5 В и токе потребления менее 60 мА обеспечивают передачу сигнала с частотой до 150 Мбит/с, задержкой менее 30 нс и разностью задержек менее 2,5 нс. Питание МСБ может быть задано как независимыми источниками на каждой из сторон, так и одним источником, при этом питание на второй стороне будет сформировано внешним трансформатором и внутренним стабилизатором напряжения.

МСБ 2011УХ015 — усилитель ошибки с гальванической развязкой, который обеспечивает передачу аналогового сигнала — выходного напряжения входного усилителя ошибки передатчика. Передатчик преобразует выходное напряжение усилителя ошибки в ШИМ-сигнал с частотой 0,8–2,6 МГц, модулирует его импульсами частотой 160 МГц и передает через изолирующие конденсаторы. Приемник усиливает импульсы амплитудой ~200 мВ с выходов изолирующих конденсаторов, преобразует их в пачки высокочастотных импульсов, восстанавливает переданный ШИМ-сигнал и преобразует его в выходное напряжение аналоговым фильтром 8-го порядка.

Аналоговый изолирующий интерфейс обеспечивает передачу напряжения 1,225 В с ошибкой менее 1 % и нелинейностью в диапазоне 0,4–2,1 В менее 1 % при температурах от −60 до 125 °С. Типовая 3-дБ полоса пропускания МСБ 2011УХ015 — 200 кГц (гр. А) или 400 кГц (гр. Б) при напряжении питания 3,3–20 В и токах потребления приемника и передатчика менее 5 мА.

Ошибка скважности восстановленного ШИМ-сигнала и, соответственно, переданного выходного напряжения обеспечивается калибровкой ширины импульса восстановленного ШИМ-сигнала при измерении микросборок изготовителем.

На схеме рис. 1 представлена функциональная схема аналогового изолирующего интерфейса.

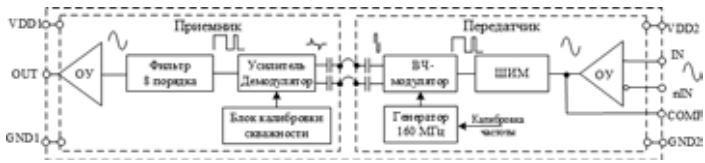



**Рис. 1.** Функциональная схема аналогового изолирующего интерфейса

Микросборки выполнены на 180-нм КМОП КНИ-технологии, что позволило существенно уменьшить паразитные емкости на подложку изолирующих конденсаторов, повысить помехоустойчивость и устойчивость к воздействию факторов космического пространства. Кристаллы передатчика и приемника собираются в металлокерамическом корпусе.

Разработка серии микросборок проводится в рамках ОКР «Схема-33-Т» и «Цифра-46-Т» по заказу Минпромторга РФ на базе ранее проведенных АО «ПКК Миландр» исследований конструктивно-технологических решений реализации емкостных изолирующих интерфейсов.

***Литература***

1. Data Sheets, ADuM1200_1201.pdf, ADuM2400_2401_2402.pdf, ADuM3440_3441_3442.pdf www.analog.com.
2. Data Sheets, ADuM3190.pdf www.analog.com.

УДК 621.3.049.774.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.263.268

# Серия микросхем статической памяти 16, 32 и 64 Мбит отечественного производства

## A Series of 16, 32 and 64 Mbit Static Memory Integrated Circuits of Domestic Production

**Иванов С. А.[1], Игнатьев С. М.[2], Мещанов В. Д.[3], Рыбалко Е. С.[4], Шелепин Н. А.[5], д. т. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[1] seivanov@niime.ru, [2] signatev@niime.ru, [5] nchelepin@niime.ru*
*ООО «СИТРОНИКС-МИКРОДИЗАЙН»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, помещение V, офис 2*
*[3] sitmd11@smd-001.ru, [4] rybalko@smd-001.ru*

**Ivanov S. A.[1], Ignatev S. M.[2], Meshchanov V. D.[3], Rybalko E. S.[4], Shelepin N. A.[5], Sc.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[1] seivanov@niime.ru, [2] signatev@niime.ru, [5] nchelepin@niime.ru*
*SITRONICS-MICRODESIGN LLC*
*office 2, placement V, 6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*[3] sitmd11@smd-001.ru, [4] rybalko@smd-001.ru*

Представлены результаты освоения производства в АО «Микрон» ряда однокристальных микросхем 90 нм КМОП синхронных статических ОЗУ информационной емкостью 16 и 32 Мбит и многокристальных модулей информационной емкостью 32 и 64 Мбит серий 1663 и 9013 с временем выборки адреса не более 10–18 нс.
**Ключевые слова:** ИМС; МКМ; КМОП; СОЗУ; элемент памяти; быстродействие; радиационная стойкость; коммутационная плата.

The results of mastering the production at JSC Mikron of a number of single-chip integrated circuits 90 nm CMOS synchronous static RAM with information capacity of 16 and 32 Mbit and multi-chip modules with information capacity of 32 and 64 Mbit series 1663 and 9013 with address sampling time no more than 10–18 ns are presented in the article.
**Keywords:** IC; MCM; CMOS; SRAM; memory cell; high-speed; radiation resistancy; transponder.

В АО «Микрон» освоено производство однокристальных микросхем 90 нм [1, 2] КМОП синхронных статических ОЗУ информационной емкостью 16 и 32 Мбит и многокристальных модулей информационной емкостью 32 и 64 Мбит [3, 4, 5]. Их основные характеристики приведены в табл. 1 и 2.

Функциональной особенностью разработанных кристаллов СОЗУ является возможность выбора их разрядной организации из ряда 8, 16 и 32 бит посредством переключения логических уровней на специальных входах управления и способа питания ядра как от внешнего источника, так и от встроенного в кристалл преобразователя напряжения посредством изменения подключений выводов кристалла.

**Таблица 1.** Типономиналы, тип корпуса, организация и напряжение питания однокристальных микросхем СОЗУ и многокристальных модулей

| **Параметр** | **Однокристальные микросхемы с напряжением питания 2,5 В** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Типономинал микросхемы** | **1663РУ1Т** | **1663РУ11Т** | **1663РУ2Т** | **1663РУ21Т** | **1663РУ3Т** | **1663РУ4Т** |
| Информационная организация, слов×бит | 1М×16 | 1М×16 | 512К×32 | 512К×32 | 2М×16 | 4М×8, 2М×16, 1М×32 |
| Два источника напряжения питания ядра и периферии, В | 1,2 и 2,5 | – | 1,2 и 2,5 | – | 1,2 и 2,5 | 1,2 и 2,5 |
| Один источник напряжения питания В | – | 2,5 | – | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Информационная емкость, бит | 16М | | | | 32М | |
| Тип корпуса | 4226.108-2.02 | | | | 4226.108-2.03 | |
| Бескорпусное исполнение | 1663РУ1Н4 | | | | 1663РУ4Н4 | |
| Размеры кристалла, мм | 6,1×6,5 | | | | 8,5×8,3 | |

| **Параметр** | **Однокристальные микросхемы СОЗУ16 Мбит с напряжением питания 3,3 В** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Типономинал микросхемы | 1663РА05А4 | 1663РА05В4 | 1663РА06А4 | 1663РА06В4 | 1663РА07А4 | 1663РА07В4 |
| Информационная организация | 512К×32 | 512К×32 | 1М×16 | 1М×16 | 2М×8 | 2М×8 |
| Один источник напряжения питания, В | – | 3,3 | – | 3,3 | – | 3,3 |
| Два источника напряжения питания ядра и периферии, В | 1,2 и 3,3 | – | 1,2 и 3,3 | – | 1,2 и 3,3 | – |
| Тип корпуса | 4226.108-2.03 | | | | | |
| Бескорпусное исполнение | 1663РА05Н4 | | | | | |
| Размер кристалла, мм | 7,0×8,06 | | | | | |

**Таблица 1.** (*Окончание*)

| Параметр | Многокристальные модули на основе кристалла емкостью 16 Мбит с напряжением питания 3.3В | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Типономинал микромодуля** | **9013РА01А4** | **9013РА01В4** | **9013РА02А4** | **9013РА02В4** |
| Тип корпуса | 4228.220-А | | | |
| Один источник напряжения питания В | – | 3,3 | – | 3,3 |
| Два источника напряжения питания ядра и периферии, В | 1,2 и 3,3 | – | 1,2 и 3,3 | – |
| Информационная емкость, Мбит | 32 | | 64 | |
| Тип корпуса | 4228.220-А | | | |
| Разрядная организация, бит | 8, 16, 32 | | | |

**Таблица 2.** Параметры энергопотребления, быстродействия и спецстойкости

| Параметр | Однокристальные микросхемы | | Многокристальные модули | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Напряжение питания 2,5 В | | Напряжение питания 3,3 В | | |
| | 16 Мбит | 32 Мбит | 16 Мбит | 32 Мбит | 64 Мбит |
| Типономиналы микросхем | 1663РУ1Т, 1663РУ11Т, 1663РУ2Т, 1663РУ21Т | 1663РУ3Т, 1663РУ4Т | 1663РА05А4, 1663РА05В4, 1663РА06А4, 1663РА06В4, 1663РА07А4, 1663РА07В4 | 9013РА01А4, 9013РА01В4 | 9013РА02А4, 9013РА02В4 |
| Время выборки адреса, норма ТУ, нс | 10 | 10 | 12 | 18 | 18 |
| Время выборки адреса типовое, нс | 7,9 | 8,0 | 9,1 | 12,6 | 13,4 |
| Время цикла записи/считывания, нс | 10 | 10 | 10 | 26 | 26 |
| Стойкость к фактору 7.$И_6$ | 1,2×5$У_С$ | 6$У_С$ | 6$У_С$ | 6$У_С$ | 6$У_С$ |
| Стойкость к фактору 7.$И_7$ | 6$У_С$ | 11×4$У_С$ | 6$У_С$ | 6$У_С$ | 6$У_С$ |

**Таблица 2.** (*Окончание*)

| Параметр | Однокристальные микросхемы | | | Многокристальные модули | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Напряжение питания 2,5 В | | Напряжение питания 3,3 В | | |
| | 16 Мбит | 32 Мбит | 16 Мбит | 32 Мбит | 64 Мбит |
| **Энергопотребление. Микросхемы и микромодули с двумя источниками питания** | | | | | |
| Статический ток потребления ядра и периферии, норма ТУ, мА | 50 и 5 | 50 и 5 | 50 и 5 | 75 и 8 | 150 и 16 |
| Статический ток потребления ядра и периферии, типовое значение, мА | 9,5 и 0,5 | 27,3 и 1,6 | 9,2 и 0,5 | 15,8 и 2,38 | 23,2 и 5,4 |
| Динамический ток потребления ядра и периферии, норма ТУ, мА | 150 и 20 | 150 и 20 | 150 и 20 | 150 и 20 | 250 и 40 |
| Динамический ток потребления ядра и периферии типовое значение мА | 27,5 и 1,5 | 43,0 и 1,1 | 28,3 и 0,84 | 32,0 и 6,35 | 43,3 и 40 |
| **Энергопотребление. Микросхемы и микромодули с одним источником питания** | | | | | |
| Статический ток, норма ТУ, мА | 50 | 50 | 50 | 85 | 160 |
| Статический ток, тип. значение, мА | 15,1 | 28,3 | 8,5 | 17,0 | 29,9 |
| Динамический ток, норма ТУ, мА | 150 | 150 | 150 | 170 | 260 |
| Динамический ток, тип. значение, мА | 34,2 | 44,25 | 29,0 | 37,2 | 60,8 |
| Примечания: 1. В качестве типового значения указаны наихудшие фактические измеренные значения образцов опытных партий в диапазоне рабочих температур от −60 до +125°С.<br>2. Для факторов 7.$И_6$, 7.$И_7$ указаны максимальные уровни оказанного воздействия. | | | | | |

Эти особенности позволили спроектировать целый ряд интегральных микросхем (ИМС) серии 1663, содержащей по шесть типов с 2,5- и 3,3-вольтовым питанием периферии и многокристальных модулей (МКМ) серии 9013 — четыре типа СОЗУ 32 и 64М с питанием периферии от 3,3 В.

МКМ выполнены по методу двухуровневой сборки, заключающейся в монтаже двух или четырех лежащих в одной плоскости приборных кристаллов СОЗУ 16М на коммутационную плату, устанавливаемую в плоский металлокерамический корпус. Коммутационная плата изготавливается из кремния по стандартному технологическому процессу в части формирования слоев металлических проводников, окон межслойных соединений и контактных площадок (КП) [6]. Соединения КП приборных кристаллов с КП коммутационной платы и связи КП платы и корпуса выполнены алюминиевой проволокой.

ИМС и МКМ, особенно с питанием от 3,3 В, вызвали живой интерес у потенциальных потребителей еще до окончания ОКР. Ряд полученных пожеланий и предложений по усовершенствованию и расширению функциональных возможностей изделий может быть реализован при ожидаемом в перспективе расширении названных серий ИМС и МКМ.

Высокая универсальность кристаллов СОЗУ позволяет решить целый ряд этих задач без корректировки топологий, а только за счет изменения подключений выводов, замены типа корпуса и разработки новой коммутационной платы, в частности для создания МКМ СОЗУ 128 Мбит.

***Литература***

1. Шелепин Н. А. Особенности разработки технологии и средств проектирования высоконадежных микросхем с технологическим уровнем 90 нм // Международный форум «Микроэлектроника-2018», 4-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов, 2018. — С. 223–226.
2. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов, изд. 2-е, испр. [Текст]: Монография. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — 800 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы 2018630190 РФ. Кристалл статического ОЗУ 16 Мбит с переключаемой разрядностью из ряда 8, 16 и 32 бит для микросхем 1663РУ1Т, 1663РУ2Т, 1663РУ11Т, 1663РУ21Т / С. А. Иванов, С. М. Игнатьев, А. С. Лушников, В. Д. Мещанов, Е. С. Рыбалко, Н. Н. Фомичева; заявитель и правообладатель РФ — № 2018630175; заявл. 12.10.2018.
4. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы 2018630188 РФ. Кристалл статического ОЗУ 32 Мбит с переключаемой разрядностью из ряда 8, 16 и 32 бит для микросхем 1663РУ3Т, 1663РУ4Т / С. А. Иванов, С. М. Игнатьев, А. С. Лушников, В. Д. Мещанов, Е. С. Рыбалко, Н. Н. Фомичева; заявитель и правообладатель РФ — № 2018630177; заявл. 12.10.2018.

5. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы 2019630045 РФ. Кристалл статического КМОП ОЗУ 16 Мбит с переключаемой разрядностью из ряда 8, 16 и 32 бит для микросхем 1663РА05А4, 1663РА05В4, 1663РА06А4, 1663РА06В4, 1663РА07А4, 1663РА07В4 / С. А. Иванов, С. М. Игнатьев, А. С. Лушников, В. Д. Мещанов, Е. С. Рыбалко, Н. Н. Фомичева; заявитель и правообладатель РФ — № 2019630022; заявл. 26.02.2019.
6. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.

УДК 004.087.2 + 004.076.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.269.270

# Разработка специализированной микросхемы энергонезависимой перепрограммируемой памяти SONOS

## Designing SONOS Non-volatile Programmable Memory IC for Special Purpose Application

**Ермаков И. В., Зубов И. А., Нуйкин А. В., Алферов В. А.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*iermakov@niime.ru*

**Ermakov I. V., Zubov I. A., Nuykin A. V., Alferov V. A.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*iermakov@niime.ru*

Представлены результаты разработки функциональных блоков микросхемы энергонезависимой электрически программируемой памяти SONOS для специальных применений, выполненной в КМОП-технологии уровня 180 нм.
**Ключевые слова:** КМОП; энергонезависимая память; SONOS; СФ-блок; блок памяти.

This paper presents the results of functional blocks design of SONOS non-volatile electrically programmable memory IC for special purpose application in 180 nm CMOS process.
**Keywords:** CMOS; non-volatile memory; SONOS; IP; memory block.

Развитие современной и перспективной электроники систем управления, мониторинга, приема, хранения и обработки данных в различных областях техники общего и специального назначения требует наличия в номенклатуре отечественной ЭКБ микросхем энергонезависимой памяти, характеризуемых определенными значениями объема, ресурса перезаписи и обращений, а также стойкости к различным факторам внешнего воздействия, в том числе спецфакторам [1, 2].

Наиболее распространенным на сегодняшний день и широко применяемым видом энергонезависимой полупроводниковой памяти является электрически стираемое программируемое ПЗУ (ЭСППЗУ или EEPROM), что обусловлено его хорошей совместимостью с КМОП-технологией, а также удовлетворительными для коммерческого применения эксплуатационными характеристиками [3]. Однако ЭСППЗУ с плавающим затвором не обладает достаточной стойкостью к специальным воздействиям, поэтому не может рассматриваться как базовый вариант для систем специального назначения. В связи с этим во всем мире ведутся исследования и осваивается серийное производство альтернативных видов энергонезависимой памяти, среди которых наиболее известны следующие типы: SONOS, сегнетоэлектрическая память FeRAM, резистивная память ReRAM и ее разновидность PCRAM, магнитная память MRAM и др. Среди них SONOS [4] является наиболее совместимой со стандартным КМОП-процессом, тогда как остальные виды перспективной энергонезависимой памяти задействуют новые материалы или используют разорванный цикл производства.

В конце 2020 года стартовал рассчитанный на три года проект с Фондом перспективных исследований (ФПИ), в рамках которого специалистами АО «НИИМЭ» должны быть разработаны технология и первая отечественная микросхема SONOS. На первом этапе проекта разработан и изготовлен прототип тестовой микросхемы и разрабатывается тестовая микросхема в КМОП-технологии уровня 180 нм. Прототип тестовой микросхемы содержит тестовые полосы с ячейками памяти SONOS, которые варьируются по геометрическим размерам, а партия пластин была разбита на группы для вариации толщин слоев ONO-стека. После изготовления партии были проведены измерения и исследования всех заложенных конструкций элемента хранения SONOS, определен наиболее оптимальный вариант, который обеспечивает приемлемые электрические режимы и требуемый ресурс. Параллельно ведется разработка тестовой микросхемы, в состав которой входит матрица ячеек памяти и некоторые блоки управления.

***Работа выполнена при поддержке ФПИ (проект № 7-208-2020-2024) «Радиационно стойкая энергонезависимая память».***

***Литература***

1. Красников Г. Я., Мещанов В. Д., Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4–64 Мбит для космических применений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2 (158). — С. 4–10.
2. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. Москва, 1999. — С. 162–174.
3. Ermakov I., Zubov I., Nuykin A., Timoshin S., Vasilyev E. An Ultra Low-Power Low-Cost EEPROM for UHF RFID Tags in a Single-Poly 90 nm CMOS Process // Proceedings of 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 108–111.
4. Червонный Д. В., Арилин Р. А., Матвеев Н. Н., Скоморохов Д. В., Петров А. Г. Разработка радиационно стойкой энергонезависимой ячейки памяти SONOS на базе технологии 180 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 228–229.

УДК 621.372.412 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.271.272

# Перспективные образцы кварцевых и СВЧ-генераторов для ответственных применений

## Perspective Samples of Quartz and SHF-generators for the Responsible Applications

**Ложников А. О., к. т. н.**
*АО «ОНИИП»*
*644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231*
*crystal@oniip.ru*

**Lozhnikov A. O., Ph.D**
*ONIIP JSC*
*231 Maslennikova St., Omsk, 644009, Russia*
*crystal@oniip.ru*

Разработаны новые модели кварцевых и ПАВ-генераторов для применения в специальной и космической технике. Показаны особенности их проектирования для обеспечения требований по стойкости к внешним воздействующим факторам.

**Ключевые слова:** кварцевый генератор; генератор на основе ПАВ-резонатора; ПАВ-резонатор.

Современные тенденции развития ЭКБ требуют создания частотозадающих компонентов с повышенной надежностью и стойкостью к внешним воздействующим факторам (ВВФ), в основном механическим, климатическим и специальным. Примером служат участившиеся за последние десять лет запросы на разработку таких устройств. Помимо высоких требований к надежности и стойкости в ВВФ требуется также применение отечественной элементной базы — импортозамещение.

За это время АО «ОНИИП» разработан ряд моделей генераторов, соответствующих описанным выше критериям.

Модели кварцевых генераторов 1 и 2 представляют собой печатную плату, на которой смонтированы элементы схемы и кварцевый резонатор-термостат. Плата установлена в резиновый амортизатор, который размещен в металлическом корпусе, заполненном азотом. Размеры корпуса — 36×27 мм, высота — 12,5 мм у модели 1 и 15 мм — у модели 2. Модель 1 — термостатированный генератор на 8–13 МГц с потребляемой мощностью в нормальных климатических условиях 0,22 Вт. Данный генератор достигает точности установления частоты $1 \cdot 10^{-7}$ за 3,15 секунд в зависимости от температуры окружающей среды, что является рекордным показателем [1]. Модель 2 — термостатированный генератор на 80–130 МГц [2]. Его особенность — особая механическая прочность: он выдерживает одиночный удар с ускорением 1500–2000 g, а также надежность: наработка до отказа не менее 140 000 часов. Высокая надежность обеспечена использованием «толстого» пьезоэлемента (5-я гармоника, ВТ-срез) и умножение частоты на 2, так как известно, что старение кварцевого резонатора, как правило, прямо пропорционально толщине пьезоэлемента: чем толще пьезоэлемент, тем меньше старение и, соответственно, больше время работы изделия.

Модель генератора 3 — моделируемый СВЧ-генератор на частоты 500–2000 МГц. По своим тактико-техническим характеристикам не уступает зарубежным аналогам, а по некоторым параметрам превосходит их. Например, достигнута более высокая надежность за счет удвоения частоты, заданной STW-резонатором (ПАВ), и обеспечена герметичность конструкции. Конструкция генератора выполнена в виде платы из LTCC-керамики со сложной топологией. Контур платы металлизирован, что позволяет герметизировать генератор при установке на нее металлической крышки. Габаритные размеры генератора — 21×13×7 мм. Помимо автогенератора, умножителя частоты и СВЧ-усилителя в конструкции предусмотрен ключ на пин-диодах, обеспечивающий время включения/выключения выхода генератора (модуляцию) при внешнем управлении менее 50 нс [3]. Это позволяет использовать генератор в качестве формирователя сигналов амплитудной манипуляции с технической скоростью до 2 МБод (при времени установления сигнала 1/10 посылки).

***Литература***

1. Карагусов В. И. Определение оптимальной мощности разогрева кварцевого пьезоэлемента ТД-среза // «Наноиндустрия», спецвыпуск, 2019.
2. Ложников А. О., Карагусов В. И., Розанова А. В. Термостатированный кварцевый генератор с диапазоном частот 80–130 МГц // Техника радиосвязи: науч.-тех. сб. — Вып. 4 (43). — 2019. — С. 86–93.
3. Астапенко Д. В., Ложников А. О., Карагусов В. И. Быстродействующий ключ для пьезоэлектрических СВЧ-генераторов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. XXII международная науч. конференция ГУАП: сб. статей. — СПб: ГУАП, 2019. — С. 73–76.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.273.274

# Анализ возможностей платформы Delta Design для проектирования интегральных микросхем

## Analysis of the Delta Design Platform Features to Design the Integrated Circuits

**Рыбкин С. В.**
*ООО «Eremex»*
*117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108*

**Rybkin S. V.**
*"Eremex" JSC*
*108 Profsoyuznaya St., Moscow, 117437*

На основе анализа возможностей платформы Delta Design дается оценка развития САПР для проектирования ИМС различной сложности с учетом их технологических процессов. Открытое API и большой задел в аналоговом и цифровом моделировании, поддержка синтеза для некоторых ПЛИС предоставляют большие возможности для создания САПР под микроэлектронику.
**Ключевые слова:** САПР; ИМС; SPICE; VHDL; Verilog; топология кристалла; DRC; LVS; Delta Design.

В настоящее время существует потребность в создании отечественной САПР для проектирования интегральных микросхем различной сложности с последующим изготовлением микросхем на отечественных и импортных фабриках. Платформа Delta Design уже успешно применяется для САПР электроники и содержит достаточно большой набор готовых модулей: схемотехнический редактор, редактор топологии, менеджер библиотек, редактор правил проектирования, аналоговый и цифровой симуляторы, интерактивные текстовые редакторы для SPICE- и HDL-языков и модуль выпуска производственных файлов.

Возможности платформы расширяются за счет создания различных модулей, взаимодействующих между собой через открытый API. Для проектирования ИМС необходимо создание новых или расширение функциональных возможностей уже готовых модулей. Изучив различные маршруты проектирования ИМС и сопоставив предъявляемые требования к этапам проектирования ИМС с уже реализованными процессами на платформе Delta Design, получили набор новых требований.

Гибкая конфигурация библиотек позволяет реализовать поддержку проектирования ИМС практически без доработок, т. к. библиотека связывает все необходимое: УГО, топологию, SPICE-модели с возможностью их параметризации, HDL-модели и различные атрибуты.

Схемотехнический редактор поддерживает создание практически любых схем с возможностью использования блоков, описываемых на SPICE- или HDL-языках.

Аналоговый симулятор требует доработки в поддержке моделей транзисторов BSIM3, BSIM4 и EVK. Цифровой симулятор поддерживает VHDL, Verilog и SystemVerilog, за исключением зашифрованных IP-блоков. Требуется доработка синтеза для поддержки более широкого набора библиотечных компонентов под PDK от фабрик.

Топологический редактор обладает необходимым функционалом, но следует добавить инструменты для работы с компонентами, создаваемые за счет мультиплицирования, например транзисторы с параметром mult > 1. Для поддержки проектирования цифровых микросхем добавятся различные вспомогательные режимы выравнивания и размещения компонентов, таких как привязка к «рельсам», авторазмещение.

Большие изменения затронут систему проверки правил проектирования и модуль выпуска производственных файлов. Кроме этого, появятся новые модули: проверки соответствия топологии и схемы (LVS) и экстракции паразитных элементов (RCX).

Открытое API ускорит создание новых модулей для решения конкретных задач на платформе Delta Design под нужды определенного технологического процесса, в том числе с помощью внешних разработчиков.

***Литература***

1. Разработка моделей отечественных пассивных электронных компонентов и их интеграция в системы автоматизированного проектирования / И. Белков, Ю. Еремеев, И. Малышев, С. Рыбкин // Электроника НТБ, 2021. — Вып. 3. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.204.3.80.86.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.275.277

# Обзор сквозного специализированного маршрута проектирования высокоплотных систем в корпусе на базе решений Siemens EDA (ex. Mentor Graphics)

## Overview of the Cross-cutting Specialized Route to Design the Highly Cute Systems in a Case Based on Siemens EDA Solutions (ex. Mentor Graphics)

**Филиппов А. А.**
*АО «МЕГРАТЕК»*
*123007, г. Москва, Хорошевское ш., 38, корп. 1*
*lokhov@megratec.ru*

**Filippov A. A.**

Представлен обзор средств САПР Siemens EDA, успешно применяемых в решении задачи проектирования высокоплотных систем в корпусе.
**Ключевые слова:** SiP; системы в корпусе; flip-chip; интерпозер; 2,5D; HDAP; FO-WLP; ASIC; FPGA; flip-chip; SI integrity; Power integrity; целостность питания; целостность сигнала; themral simulation; DFM; BGA; OSAT; прототипирование.

В гонке за PPA (Power — энергопотребление, Performance — производительность, Area — площадь), ведущим к увеличению числа транзисторов на единицу площади, есть параллельный или же акселерационный путь — системы в корпусе.

Интерес к применению систем в корпусе вызван следующими факторами:

1) стоимостью внедрения субнанометровых технологий. Разница цены разработки нового СнК по технологии 3 и 10 нм составляет 179 млн $. Корпусирование, как правило, позволяет вписаться в меньший бюджет за счет сочетания в корпусе ИС, построенных на разных технологических процессах;
2) доступностью соответствующих производственных мощностей. К примеру, Intel в настоящее время не имеет доступ к технологиям ниже 10 нм [1] в отличие от TSMC [2]. Как результат, демонстрируется фокус на технологии систем в корпусе и инвестиции Intel в НИОКР систем в корпусе составят 3,5 млрд долларов США [3]

Системы в корпусе — это набор нескольких интегральных схем и других элементов, соединенных между собой на подложке. Сигнал доставляется различными способами, включая интерпозеры. ИС при этом компонуются в 2,5D (ИС располагаются рядом, обмениваясь через единый интепозер) или 3D, когда ИС находятся одна над другой. Применяются эти и другие комбинации.

К высокоплотным (HDAP) и, соответственно, максимально требовательным к качеству дизайна мы относим системы, имеющие в своем составе:

- FOWLP (Fan-Out Wafer Level Packaging),
- Flip Chip с более чем 5000 выводов,
- комбинации активных, пассивных, аналоговых, ВЧ-модулей,
- 2,5D-, 3D-компоновка и их всевозможные комбинации.

Система в корпусе представляет, таким образом, частично кремний, а частично плату. Методики и инструменты проектирования ПЛИС и печатных плат складывались при этом годами.

Для САПР по ПЛИС характерны:

1) GDSII-формат,
2) среда Linux,
3) набор производственных правил (PDK), продиктованных процессом разработки,
4) манхеттенская геометрия,
5) кремниевые слои,
6) проверка правил проектирования строго на выходных данных.

Для САПР по печатным платам характерны:

1) формат Gerber,
2) поддержка Windows,
3) производство, ориентированное на дизайн, и возможность взаимной итеративной доработки и производственного процесса, и дизайна,
4) неманхеттенская геометрия,
5) RDL-слои из органики,
6) проверка правил проектирования как составная часть проекта.

Учет этих различий и итоговое создание надежной среды проектирования критичны для успешной разработки систем в корпусе.

Важность применения специализированной коммерчески состоятельной САПР-платформы вызвана следующими фундаментальными факторами:

- широкая функциональная поддержка всего маршрута: планирования подложки [4], физического размещения и трассировки [5], прототипирования, предпроизводственных проверок;
- бесшовная интеграция различного типа данных и моделей в общую цифровую среду. Необходима платформа, позволяющая гибко управлять и администрировать изменения в дизайне всей командой инженеров, поддерживать их коллективную одновременную работу. Требуется поддержка открытых непроприетарных индустриальных форматов для построения индивидуальных интеграционных связей;
- большой набор верифицированных средств моделирования [6] по целостности питания, целостности сигналов, тепловому моделированию, поддержке SERDES, экстракции паразитных параметров и т. д.;
- надежные и доверенные средства физической верификации и signoff всей сборки — Calibre 3D Stack [7];
- поддержка технологической кооперации между дизайн-центрами и крупными фабриками для обмена и актуализации ADK (сборочных дизайн-китов) [8];
- непрерывное обновление возможностей САПР, отражающих современные методики проектирования, а также наличие возможности инженерного обучения и консалтинга.

В России на базе МИЭТ и АО «Мегратек» (www.megratec.ru) организован центр экспертизы по системам в корпусе, укомплектованный необходимыми элементами САПР, документацией и методическими материалами. Также экспертами Siemens EDA регулярно проводятся курсы повышения квалификации.

***Литература***

1. Intel Confirms 10 nm Ice Lake Xeon Production Has Started. by Dr. Ian Cutress. URL: https://www.anandtech.com/show/16380/intel-confirms-10 nm-ice-lake-xeon-production-has-started.
2. Logic Technology. URL: https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic.
3. INTEL EXPANDS ADVANCED PACKAGING CAPABILITIES AND BRINGS JOBS TO NEW MEXICO Written by Intel Blog Admin | May 3, 2021. URL: https://blogs.intel.com/policy/2021/05/03/intel-expands-advanced-packaging-capabilities-and-brings-jobs-to-new-mexico.
4. Xpedition Substrate Integrator. Heterogeneous and homogeneous 2.5/3DIC Package Connectivity Planning, assembly prototyping & system technology co-optimization. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic-packaging/software/substrate-integrator.
5. Xpedition Package Designer. Heterogeneous and homogeneous 2.5/3DIC Package physical implementation and manufacturing handoff. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic-packaging/software/package-designer.
6. Package Simulation. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic-packaging/software/package-simulation.
7. Calibre 3DSTACK. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic/calibre-design/physical-verification/3dstack.
8. OSAT Alliance Program. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic-packaging/osat-alliance.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.278.280

# UVM и эмуляция: черты современного маршрута функциональной верификации цифровых систем

## UVM and Emulation: Peculiarities of Modern Path Functional Verification of Digital Systems

**Коробков М. А., к. т. н.**
*«Сименс Электроник Индастри Аутомейшн»*
*119049, г. Москва, ул. Шаболовка, 10*
*mikhail_korobkov@mentor.com*

**Korobkov M. A., Ph.D**

Представлен анализ, доказывающий важность применения унифицированных методологий и технологий аппаратной эмуляции для эффективной функциональной верификации цифровых систем.

**Ключевые слова:** функциональная верификация; FPGA; ASIC; RTL; UVM; debug; симуляция; эмуляция; прототипирование.

Широко известно, что при разработке интегральных схем количество времени и ресурсов, затрачиваемых на верификацию, может значительно превышать количество времени и ресурсов, затрачиваемых на проектирование. Обзор современной литературы и различных источников со статистикой по отрасли подтверждает этот факт.

Многие ведущие САПР-компании пишут, что проектные группы тратят от 50 до 70 процентов своего времени и ресурсов на проверку функциональности. При этом 70 процентов общего этапа проектирования посвящено верификации [1]. Учитывая, что размеры и сложность проектов постоянно растут, риски и усилия, прилагаемые для верификации проектов, возрастают многократно.

Согласно исследованиям, проведенным Wilson Research Group [2], доля проектов, в которых удается получить сразу корректно работающий ASIC с фабрики, составляет чуть более 30 %, со второй итерации — 45 и 13 % — после третьей итерации. Причем пограничной технологией, когда риск респина равен вероятности получения целевого дизайна, является технология в 14 нм [3]. Из этого следует, что по статистическому опыту действующих дизайн-центров при дальнейшем уменьшении проектных норм вероятность респина становится выше 50 %. По причине больших финансовых и временных затрат (промах на 10 нм технологии сопряжен с издержками в 10 млн долларов и задержкой на несколько месяцев [4]) крайне важно получать работающее изделие сразу на первой итерации. Учитывая стремительные темпы появления новых продуктов и игроков на рынке, крайне важно выпустить готовое изделие быстрее конкурентов.

Для достижения такой цели проектные группы выполняют верификацию своих проектов на различных этапах их разработки. Сегодня общемировой практикой верификации является переход на использование унифицированных библиотек и методологий верификации, которые прошли длинный путь к единообразию предлагаемых средств и инструментов, позволяющих быстро и практически безболезненно ими овладеть и использовать их для отладки проектов на этапе написания

RTL-кода. Согласно [5] три наиболее востребованные методологии на 2020 год — это UVM (Universal Verification Methodology), UVVM (Universal VHDL Verification Methodology) и OSVVM (Open Source VHDL Verification Methodology), они формируют основной костяк функциональной верификации. Остальные методологии сегодня мало востребованы.

Наряду с развитием методологий функциональной верификации особую роль играют средства автоматизации проектирования электроники (EDA — Electronic Design Automation), в т. ч. усиленные технологиями аппаратной поддержки.

Последнему в РФ уделяется крайне малое внимание. При этом на зарубежных рынках, составляющих остальные 98 % глобального рынка электроники, начиная с 2018 года объем поставок систем аппаратной поддержки эмуляторов, например Veloce [6], превысил объем HDL-симуляции (средства функциональной верификации без аппаратной поддержки, например Questa [7]). При этом указанный разрыв постоянно увеличивается при практически нулевом росте средств симуляции [8].

Методологическим порогом могут являться проекты емкостью более 80 млн логических гейтов, ведь именно с этого значения 47 % заказчиков используют эмуляторы. Хотя для достижения высокого покрытия СнК функциональными тестами, например компонентной базы систем автономного транспорта или искусственного интеллекта (в н. в. 27 % проектов в среднем по миру от общего числа разработок СнК), потребность в эмуляции может возникнуть и на проектах меньшего объема [9].

К типовым задачам, которые успешно решаются эмуляцией, относятся:

- отладка работы ОС на микропроцессоре. Дает возможность работы над системным и прикладным ПО параллельно с созданием архитектуры процессора [10];
- отладка сетевого маршрутизатора 5G на реальном траффике;
- ранняя оценка и моделирование энергопотребления СнК [11];
- запуск регрессии, проверка работы нейросети с тысячекратным увеличением производительности.

Эмулятор представляет из себя специализированный дата-центр, в основе которого есть аппаратная часть, операционная система и набор отраслевых приложений, которые заказчик через API может модифицировать и развивать самостоятельно.

- Аппаратная часть в случае платформы, производимой Siemens EDA, уникальна.

RTL-код компилируется непосредственно в оборудование на основе заказных СБИС. Их специализированная архитектура обеспечивает максимальную общую производительность системы (так называемый through put), а также ее энергопотребление.

- Операционная система управляет распределением заданий по аппаратной части, поддерживает независимых пользователей с одновременной их удаленной работой на системе, приоритизацию заданий и проч.
- Специализированные приложения обеспечивают виртуализацию интерфейсов (USB, PCI, Ethernet и др.), а также интегрируют результаты компиляции RTL с прикладными задачами анализа энергопотребления (power analysis), отладки ПО, анализа тестопригодности (DFT), fault injection и др.

Платформа имеет долгую историю и успешный опыт применения. Например, AMD использовал Veloce для функциональной верификации AMD Zen2, игровые видеокарты Radeon RDNA2, отладки решений для суперкомпьютера Frontierr ~1,5 exaFLOPS [12].

***Литература***


1. Wiemann A. Standardized Functional Verification. Springer, 2008. 289 p.
2. Foster H. The 2020 Wilson Research Group Functional Verification Study: Part 12. URL: https://blogs.sw.siemens.com/verificationhorizons/2021/02/03/part-12-the-2020-wilson-research-group-functional-verification-study (дата обращения: 14.08.2021).
3. Semico Research Corp. Apr 2021. Figure 32: Design Respin Climate is Worsening.
4. Chip Design Challenges: Driving the Need for Hardware-Assisted Verification. Jean-Marie Brunet is the senior director of product management and engineering for the Scalable Verification Solutions Division at Siemens EDA. URL: https://www.semi.org/en/blogs/technology-trends/chip-design-challenges-driving-need-hardware-assisted-verification.
5. Foster H. The 2020 Wilson Research Group Functional Verification Study: Part 6. URL: https://blogs.sw.siemens.com/verificationhorizons/2020/12/16/part-6-the-2020-wilson-research-group-functional-verification-study (дата обращения: 14.08.2021).
6. Veloce: [Электронный ресурс]. Мегратек. URL: https://megratec.ru/product/veloce.
7. Questa: [Электронный ресурс]. Мегратек. URL: https://megratec.ru/product/questa (дата обращения 14.08.2021).
8. Market-Driven Trends in Hardware Emulation. Table #1: Revenue trends for hardware-assisted verification show growth. (Image source: The ESD Alliance, a SEMI Technology Community). URL: https://www.eetimes.com/market-driven-trends-in-hardware-emulation.
9. Functional Safety Ecosystem. Robert Serphillips, Siemens EDA. URL: https://webinars.sw.siemens.com/veloce-fault-app-accelerate-time/room.
10. Andy Meier talks about Veloce HYCON. By deploying a SW-enabled environment design and verification teams can achieve silicon success faster. URL: https://resources.sw.siemens.com/en-US/video-andy-meier-talks-about-veloce-hycon.
11. Cisco: Early RTL Power and KPI Analysis using PowerPro and Veloce PowerApp. URL: https://webinars.sw.siemens.com/cisco-early-rtl-power-and-kpi-1/join.
12. An AMD perspective: The future of hardware-assisted verification. Alex Starr, AMD Corporate Fellow. URL: https://resources.sw.siemens.com/en-US/video-an-amd-perspective-the-future-of-hardware-assisted-verification.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.281.282

# Цифровые модели в электронной промышленности: базовые элементы технологических библиотек, сложно-функциональные блоки, изделия ЭКБ

## Digital Models in the Electronics Industry: Basic Elements of Technological Libraries, Complex-functional Blocks, and ECB Products

**Елесин В. В., к. т. н., Сотсков Д. И., Жидков Н. М., Данилов И. А., Кузнецов А. Г., Усачев Н. А., к. т. н.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*iadan@spels.ru*

**Yelesin V. V., Ph.D, Sotskov D. I., Zhidkov N. M., Danilov I. A., Kuznetsov A. G., Usachev N. A., Ph.D**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*iadan@spels.ru*

Рассмотрены вопросы создания и применения цифровых моделей элементов библиотек базовых технологических процессов, сложно-функциональных блоков и изделий электронной компонентой базы в отечественной электронной промышленности, в том числе учитывающих радиационное воздействие.
**Ключевые слова:** цифровые модели; сложно-функциональные блоки; ЭКБ; базовые технологические процессы; радиационно-ориентированная модель; сверхвысокие частоты.

Изделия электронной компонентной базы (ЭКБ), необходимые для создания конкурентоспособных систем связи передачи данных, связи, навигации радиолокации, радиочастотной идентификации и др., представляют собой высокоинтегрированные приемо-передающие БИС с рабочими частотами от 0,4 до 100 ГГц. Подобные приемо-передающие БИС, в т. ч. вида «система на кристалле» (СнК) и «система в корпусе» (СвК), включают радиочастотный тракт, тракт цифровой обработки, высокоскоростные интерфейсы, а также микропроцессор и память и изготавливаются с использованием следующих базовых технологических процессов (БТП) [2]: КМОП/КМОП КНИ 0,18–0,04 мкм, SiGe БиКМОП 0,42–0,13 мкм (СнК), GaAs pHEMT 0,5–0,1 мкм, GaAs HBT 2–1 мкм, GaN HEMT 0,5–0,1 мкм (СвК).

Одним из важнейших свойств ЭКБ, используемых для создания отказоустойчивой аппаратуры доверенного назначения, является радиационная стойкость (РС), представляющая комплексный показатель качества изделия. Оценка показателей РС зачастую проводится на завершающем этапе, что делает невозможной при необходимости коррекцию изделия или его составных частей (в т. ч.

сложно-функциональных (IP) блоков). Решением проблемы является применение на этапах проектирования специализированных цифровых моделей, учитывающих радиационное воздействие (РОМ) [1, 2].

Представлены примеры поведенческих, приборно-технологических, макромоделей базовых элементов, IP-блоков, изделий ЭКБ, предназначенных для применения в стандартных системах проектирования. Практическая апробация моделей проведена в кооперации с ведущими отечественными дизайн-центрами ЭКБ в ходе разработки более чем 60 IP-блоков приемо-передающих БИС с частотами до 30 ГГц.

***Литература***

1. Елесин В. В., Сотсков Д. И., Усачев Н. А., Кузнецов А. Г. Особенности создания и применения радиационно-ориентированных моделей при проектировании отказоустойчивых изделий СВЧ-диапазона класса «система на кристалле» и «система в корпусе» на основе кремния, кремний-германия и арсенида галлия // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 339–341.
2. Елесин В. В., Усачев Н. А., Никифоров А. Ю. и др. Базовая технология проектирования широкой номенклатуры изделий СВЧ-диапазона вида «система на кристалле» и «система в корпусе», ориентированной на отечественные кремниевые и арсенид-галлиевые контрактные производства: достижения, проблемы и ближайшие задачи // Межд. конф. «Микроэлектроника-2019». Сб. тез., 2019. — С. 28–31.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.283.285

# Элементы быстрого умножения на основе алгебры Галуа и помехоустойчивого кодирования в остаточных классах для параллельных и поточных вычислений

## Elements of Fast Multiplication Based on Galois Algebra and Noise-resistant Coding in Residual Classes for Parallel and Stream Computing

**Антонов А. А.[1], Прозорова А. Г.[1], Краснюк А. А.[2], к. т. н.**
*[1] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*
*prozorova@cs.niisi.ras.ru*
*[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*aakrasnyuk@mephi.ru*

**Antonov A. A.[1], Prozorova A. G.[1], Krasnyuk A. A.[2], Ph.D**
*[1] SRISA RAS*
*bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218*
*prozorova@cs.niisi.ras.ru*
*[2] National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*aakrasnyuk@mephi.ru*

Рассмотрена концепция построения модулей быстрого умножения для параллельных и потоковых вычислений в остаточных классах в системах помехоустойчивого кодирования. Представлены варианты функциональной реализации основных элементов кодирования и определены основные ограничения для их аппаратной реализации.
**Ключевые слова:** система остаточных классов; китайская теорема об остатках; Residue number systems; RRNS; КМОП; сбоеустойчивые системы.

The paper considers the concept of designing fast multiplication modules for parallel and stream computations in residual classes in noise-tolerant coding systems. The variants of the implementation of main coding elements have been are presented and the main limitations for their hardware implementation have been determined.
**Keywords:** Redundant Residue Number Systems; Chinese Remainder Theorem; fault-tolerant CMOS systems.

Алгоритмы быстродействующего умножения и деления для арифметики полей Галуа $GF(2^m)$ широко известны и применимы как в сетях передачи данных с использованием кодов Рида—Соломона, так и в криптографических алгоритмах, например AES (Advanced Encryption Standard), защищающих информацию от несанкционированного доступа. В общем виде операция умножения представима как алгоритм умножения элементов поля Галуа $GF(2^m)$, представляемый в виде многочленов с коэффициентами из простого поля GF(2):

$$\underbrace{a \cdot b}_{GF(2^m)} = \underbrace{\left((a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3)(b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3)\right) \bmod p(x)}_{GF(2)}.$$

Соответственно, результат имеет вид

$$\underbrace{a \cdot b}_{GF(2^m)} = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3, \text{ где } c_0 = a_0 \cdot b_0 \oplus a_1 \cdot b_3 \oplus a_2 \cdot b_2 \oplus a_3 \cdot b_1;$$

$$c_1 = a_0 \cdot b_1 \oplus a_1 \cdot b_0 \oplus a_2 \cdot b_3 \oplus a_3 \cdot b_2 \oplus a_1 \cdot b_3 \oplus a_2 \cdot b_2 \oplus a_3 \cdot b_1;$$

$$c_2 = a_0 \cdot b_2 \oplus a_1 \cdot b_1 \oplus a_2 \cdot b_0 \oplus a_3 \cdot b_3 \oplus a_2 \cdot b_3 \oplus a_3 \cdot b_2;$$

$$c_3 = a_0 \cdot b_3 \oplus a_1 \cdot b_2 \oplus a_2 \cdot b_1 \oplus a_3 \cdot b_0 \oplus a_3 \cdot b_3.$$

То есть операция быстрого умножения в полях Галуа заменяется $m$ аддитивными функциями $\oplus$ для вычисления коэффициентов $c_0 \ldots c_{m-1}$. Функции содержат слагаемые в виде произведений коэффициентов $a_i \cdot b_j$, где $i, j = 0 \ldots m - 1$. Для двоичной системы это эквивалентно логическому умножению (конъюнкции) &. Таким образом, на примере задач, стоящих перед разработчиками параллельных и многопоточных вычислительных систем, представлены выводы о применимости помехоустойчивого кодирования данных RNS на примерах модулей свертки полей GF($2^4$). Высокая производительность вычислений на основе алгебры Галуа и алгоритмов кодирования в остаточных классах определяется существенным уменьшением разрядности операций и возможностью их распараллеливания при поточных вычислениях. Рассмотрены варианты применимости этого метода при использовании помехоустойчивого кодирования RRNS. В простейшем случае обнаружение и исправление ошибок связаны с определением наличия элементарных совпадений в остаточных кодах. Несоответствие между наблюдаемой реакцией на требования, описанные в спецификации, или несоответствие между ожидаемым и наблюдаемым состоянием целевой системы считается ошибкой и просто игнорируется системой. Однако аппаратная реализация потоковых процессоров на основе RNS-кодирования будет вряд ли эффективной. Это определяется непозиционной архитектурой собственно RNS-кодирования и представления данных и сложностью применения кеш-памяти. Полученные выводы подтверждаются модельными экспериментами, и можно утверждать, что приведенные рекомендации вполне могут быть реализованы и на коммерческих FPGA.

***Публикация выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-07-00651\21***

***Литература***

1. Арифметика многократной точности на основе систем остаточных классов / К. С. Исупов, В. С. Князьков // Программные системы: теория и приложения, 2016. — № 1 (028). — С. 61–97.
2. Deev G. E., Ermakov S. V., Korol N. A., Pereguda A. I., Starkov S. O. Computers that perform calculations in the k-digit number system // Proceedings of the XVI International conference “super-calculations and mathematical modeling”, Sarov, 2016. P. 102–107.

The efficiency and high performance of calculations based on Galois algebra and coding algorithms in residual classes is determined by a significant decrease in the bit depth

of operations and the possibility of parallelizing them during thread calculations. However, the hardware implementation of stream processors based on RNS coding will hardly be efficient. This is determined by the non-positional architecture of the actual RNS encoding and data representation and the complexity of using cache memory. The possibility of using these algorithms to perform comparison operations, scaling, floating-point calculations, etc. is problematic. The obtained conclusions are confirmed by model experiments for the investigated algorithms for multichannel digital preprocessing of harmonic signals. It can be argued that these recommendations may well be implemented on commercial FPGAs.

***The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project № 19-07-00651\21.***

***References***

1. Isupov K. S., Knyazkov V. S. Parallel multiple-precision arithmetic based on residue number system. Program Systems: Theory and Applications, 2016. Vol. 7:1. P. 61–97.
2. Deev G. E., Ermakov S. V., Korol N. A., Pereguda A. I., Starkov S. O. Computers that perform calculations in the k-digit number system // Proceedings of the XVI International conference “super-calculations and mathematical modeling”, Sarov, 2016. P. 102–107.

УДК 621.382.323 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.286.288

# Проблемы TCAD-моделирования FinFET-структур с учетом радиационных эффектов

## Difficulties in TCAD Modeling of FinFET Structures Considering Radiation Effects

**Петросянц К. О.[1,2], Силкин Д. С.[1], Попов Д. А.[1]**
*[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)*
*123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*
*kpetrosyants@hse.ru*
*[2] Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)*
*124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3*

**Petrosyants K. O.[1,2], Silkin D. S.[1], Popov D. A.[1]**
*[1] National Research University "Higher School of Economics" (Moscow Institute of Electronics and Mathematics)*
*34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia*
*[2] Institute for Design Problems in Microelectronics RAS (IPPM RAS)*
*3 Sovetskaya St., Zelenograd, Moscow, 124365*

Рассмотрены особенности разработки в среде TCAD приборно-технологических моделей нанометровых FinFET-структур с учетом радиационных эффектов. Изложены основные причины возникновения больших погрешностей и препятствия к развитию моделирования воздействия радиационных эффектов в FinFET-структурах.
**Ключевые слова:** TCAD-моделирование; FinFET; ионизирующее излучение.

The papers considers the specifics of the TCAD-model development of nanometer-scale FinFET structures, taking into account radiation effects. In addition, it offers the main reasons for the occurrence of large errors in the model and obstacles to the development of radiation modeling FinFET.
**Keywords:** TCAD-simulation; FinFET; ionizing radiation.

Специфика структуры и работы FinFET многозатворных трехмерных транзисторов накладывает дополнительные требования к разработке приборно-технологических моделей.

1. Длина канала FinFET редко превышает 50 нм, а ширина ребра транзистора может составлять единицы нанометров, поэтому в модель должны быть включены малоразмерные эффекты, такие как баллистический перенос носителей заряда, квантование электронов, влияние дефектов поверхности на подвижность носителей заряда, рассеяние носителей заряда на других носителях.
2. FinFET, как правило, используются в качестве элементной базы для СБИС, предназначенных для работы в гигагерцевом диапазоне частот. ИС имеют многослойную металлизацию (BEOL), емкость и сопротивление которой могут быть значимыми в сравнении с внутренними параметрами транзистора. Поэтому для получения точного результата важно учитывать

влияние BEOL на работу транзистора. Для этого в модель необходимо добавлять внешние пассивные элементы.

3. Авторы, занимающиеся исследованием технологии создания FinFET и проводящие экспериментальные исследования в этой области, сообщают о влиянии технологического разброса на геометрические [1, 2] и физические [3, 4] параметры FinFET. С точки зрения моделирования это означает, что при создании модели модуля, состоящего из нескольких FinFET, нельзя создать единую модель, опираясь на конструкторскую документацию, — необходимо дополнительно учитывать возможную вариацию параметров и ее влияние на работу всей схемы. Как правило, последствия технологического разброса сводятся к изменению внутреннего сопротивления и порогового напряжения транзистора через вариацию ширины канала и работы выхода металла в МДП-структуре.
4. Из-за малой ширины ребра транзистора электрические поля внутри проходят его насквозь, накладываясь друг на друга. При этом изменяются подвижность носителей заряда и все связанные с ней параметры, а также пороговое напряжение. Поэтому трехмерная структура транзисторов не может быть упрощена до двухмерной модели.

Отображение структуры «один-к-одному» в модели особенно важно для моделирования последствий воздействия ионизирующих излучений. Основной причиной изменения параметров после облучения является накопление зарядов в диэлектрических областях. К таковым относятся диэлектрические слои в МДП-структуре и мелкощелевая изоляция. Эксперименты показывают, что изменение геометрии ребра транзистора способно влиять на устойчивость FinFET к радиации. В частности, в работе [5] показано, что уменьшение ширины ребра со 100 до 5 нм приводит к увеличению тока утечки на несколько порядков и увеличению сдвига порогового напряжения в несколько раз после облучения. Необходимо отметить, что часто стенки ребра имеют наклон, из-за чего его ширина от вершины к основанию увеличивается. Учитывая, насколько велика зависимость радиационной стойкости FinFET от его ширины, для моделирования радиационного воздействия форма ребра транзистора в модели должна быть передана максимально точно. Таким образом, создание адекватных радиационных моделей, в полной мере отражающих процессы, протекающие в структуре, требует наличия снимков среза моделируемых FinFET.

Еще одним аспектом моделирования FinFET под воздействием радиации является то, что в литературе практически отсутствуют данные о поведении таких транзисторов при воздействии ионизирующего излучения с дозой выше 1 Мрад. Анализируя аналогичные исследования для MOSFET [6–7], можно обнаружить, что значительные отклонения параметров от номинальных значений происходят после достижения дозы в 0,1 Мрад, а катастрофическая деградация параметров происходит в диапазоне доз 10–100 Мрад. Стабильность параметров в диапазоне доз до 1 Мрад, которую демонстрируют FinFET во многих исследованиях, таким образом, не является 100%-м показателем их радиационной стойкости, а без экспериментальных данных по стойкости к дозам свыше 1 Мрад разрабатываемые радиационные модели не могут быть должным образом верифицированы и способны носить исключительно прогностический характер.

***Литература***

1. Li B. et al. Process variation dependence of total ionizing dose effects in bulk nFinFETs // Microelectronics Reliability, 2018. V. l. 88–90. P. 946–951.
2. Mamouni F. E. et al. Fin-Width Dependence of Ionizing Radiation-Induced Subthreshold-Swing Degradation in 100-nm-Gate-Length FinFETs // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009. V. 56. № 6. P. 3250–3255.
3. Lima L. P. B., Dekkers H. F. W., Lisoni J. G., Diniz J. A., Van Elshocht S., De Gendt S. Metal gate work function tuning by Al incorporation in TiN // Journal of Applied Physics, 2014. № 115. P. 074504–1-074504-5.
4. Wanga X.-R. et al. Annealing effect on the metal gate effective work function modulation for the Al/TiN/SiO2/p-Si structure // Microelectronic Engineering, 2011. № 88. P. 573–577.
5. Chatterjee I. et al. Geometry Dependence of Total-Dose Effects in Bulk FinFETs // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014. V. 61. № 6. P. 2951–2958.
6. Pezzotta A. et al. Impact of GigaRad Ionizing Dose on 28 nm Bulk MOSFETs for Future HL-LHC // 2016 46th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). — Lausanne: IEEE, 2016. P. 146–149.
7. Zhang C.-M. et al. Mobility Degradation of 28-nm Bulk MOSFETs Irradiated to Ultrahigh Total Ionizing Doses // 2018 IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications (ICTA). Beijing: IEEE, 2018. P. 162–163.

УДК 621.382.323 + 536.48 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.289.290

# Влияние эффектов старения на электрические характеристики интегральных КМОП ОУ при уменьшении минимальных размеров транзисторов

## Influence of Aging Effects on the Electrical Characteristics of Integrated CMOS Op Amps with Reducing the Minimum Size of Transistors

**Харитонов И. А., Белопашенцев А. С.**
*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)*
*123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*

**Kharitonov I. A., Belopashentsev A. S.**
*National Research University "Higher School of Economics" (Moscow Institute of Electronics and Mathematics)*
*34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia*

С использованием расширенных возможностей SPICE-моделирования КМОП-схем даны количественные оценки усиления влияния эффектов горячих носителей на характеристики КМОП ОУ при уменьшении минимальных размеров транзисторов от долей микрометров до 30 нм.
**Ключевые слова:** КМОП ОУ; эффекты старения; надежность; HCI; NBTI; PBTI; TDDB; электромиграция; SPICE-модели.

Using the enhanced capabilities of SPICE modeling of CMOS circuits, the report presents quantitative estimates of the increased effects of hot carriers on the characteristics of CMOS operational amplifiers while the minimum size of transistors is reduced from 180 nm to 30 nm.
**Keywords:** CMOS OpAmps; aging effects; reliability; HCI; NBTI; PBTI; TDDB; electromigration; SPICE models.

Известно, что при уменьшении проектных норм КМОП-схем повышается вероятность возникновения «горячих» носителей в структурах МОПТ в стоковом переходе и подзатворном диэлектрике и усиливается влияние этих эффектов на надежность и время «жизни» перспективных КМОП-схем [1].

Системы моделирования схем ведущих САПР имеют возможности моделирования КМОП-схем с учетом перечисленных выше эффектов старения, но используемые в них модели старения описаны недостаточно подробно, практически отсутствуют наборы таких SPICE-моделей для МОПТ с разными проектными нормами. Несмотря на важность этих эффектов, отечественные проектировщики КМОП-схем редко проводят анализ влияния эффектов старения на работу схем.

В отечественную САПР, базирующуюся на SPICE-подобных платформах, нами встроена модель МОП-транзистора, учитывающая эффекты старения МОПТ, вызванные следующими механизмами: влиянием «горячих» носителей (NBTI, PBTI, HCI), процессов пробоя подзатворного диэлектрика (TDDB), электромиграции.

Расширенные возможности системы SPICE моделирования, схем за счет учета вышеупомянутых эффектов в SPICE моделях МОПТ, дали возможность провести

анализ процессов старения интегральных КМОП ОУ при уменьшении минимальных размеров транзисторов до десятков нанометров и дать оценки их надежности и времени «жизни».

Результаты проведенного анализа для проектных норм 180, 90, 45, 28 нм с учетом факторов старения показали, что наиболее сильное влияние на характеристики схем ОУ и, соответственно, надежность и время «жизни» таких схем оказывают эффекты NBTI и TDDB. В результате получены следующие оценки: относительное (по отношению к напряжению питания) изменение напряжения смещения нуля ОУ при работе ОУ в течение года увеличилось от 0,025% (для 180-нм технологии) до 0,063% (для 28-нм технологии). Время непрерывной работы до возникновения первых пробоев диэлектрика уменьшилось от $1{,}2 \cdot 10^9$ сек (для 180-нм технологии) до $7 \cdot 10^8$ сек (для 28-нм технологии) для комнатной температуры.

***В данной работе использованы результаты проекта, поддержанного грантом 20-57-53004 РФФИ.***

***Литература***

1. Bailey B. Chip Aging Becomes Design Problem // Semiconductor Engineering, August 9th, 2018. https://semiengineering.com/chip-aging-becomes-design-problem.
2. Харитонов И.А. SPICE-модели МОПТ, учитывающие эффекты старения // Наноиндустрия. Специальный выпуск. 96, 2020. — С. 300–307.
3. Elie Maricau, Georges Gielen. Analog IC Reliability in Nanometer CMOS. Springer, New York, 2013.

It is known that as the design rules of CMOS circuits become smaller, this leads to an increase in “hot” carrier effects in MOSFET structures and to reduction of reliability and life time of CMOS circuits.

We have collected, analyzed and processed data on the degradation of the characteristics of MOS transistors with time, caused by the “hot” carriers effects (HCI, NBTI, PBTI, TDDB, electro-migration) for the minimum sizes of transistors from a few micrometers to tens of nanometers. Then we accounted these effects in SPICE simulation tools, which made it possible to analyze the aging of integrated CMOS OpAmps characteristics while reducing the minimum size of transistors from 180 nm to 30 nm and to assess their reliability and life time.

The results have shown that the NBTI and TDDB effects have the strongest influence on the characteristics of the Op-Amp circuits and, accordingly, the reliability and “life” of such circuits. As a result, the most sensitive parameter of an Op-Amp during aging is the change in zero bias voltage. The relative change in the offset voltage of the Op Amp increased from 0.025% (for 180 nm technology) to 0.063% (for 28 nm technology) after 1 year of operation. The operating time to dielectric breakdowns decreased by half for these conditions.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.291.292

# Радиационно-ориентированная характеризация технологического процесса SiGe БиКМОП 0,42 мкм по тиристорному эффекту

## Radiation-oriented Characterization of the SiGe Technological Process SIGE BiCMOS 0.42 mkm by Thyristor Effect

**Кузнецов А. Г.[1,2], Елесина В. В.[1,2], Усачев Н. А.[1,2], к. т. н., Елесин В. В.[1,2], к. т. н., Будяков А. С.[3], к. т. н., Савченко Е. М.[4], к. т. н., Гаранович Д. И.[4]**
*[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*[2] АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*agkuz@spels.ru*
*[3] МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*
*[4] МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

**Kuznetsov A. G.[1,2], Yelesina V. V.[1,2], Usachev N. A.[1,2], Ph.D, Yelesin V. V.[1,2], Ph.D, Budyakov A. S.[3], Ph.D, Savchenko Ye. M.[4], Ph.D, Garanovich D. I.[4]**
*[1] National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*[2] "Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*agkuz@spels.ru*
*[3] Bauman MSTU*
*bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005*
*[4] MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

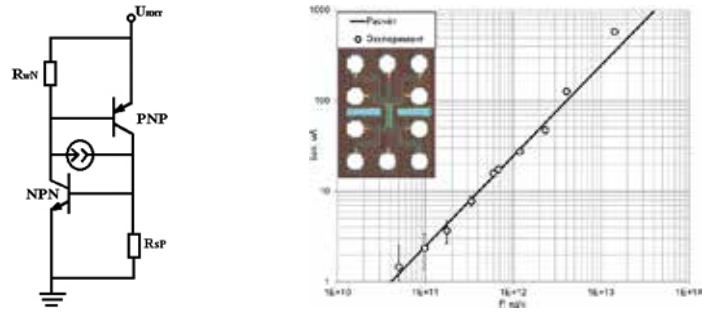
Проведена отработка методики расчетно-экспериментального восстановления параметров паразитной тиристорной структуры технологического процесса SiGe БиКМОП 0,42 мкм, предназначенной для использования в системах схемно-топологического проектирования.

**Ключевые слова:** технологический процесс; SiGe БиКМОП; сверхвысокая частота; характеризация; тиристорный эффект.

Технологический процесс SiGe БиКМОП 0,42 мкм [1] является востребованным у отечественных разработчиков благодаря высоким граничным частотам транзисторов (до 75 ГГц) и относительно невысокой стоимости производства СВЧ ИС [2, 3]. Возникновение тиристорного эффекта (ТЭ), обусловленного объемной ионизацией, существенно ограничивает область применения СВЧ ИС, изготовленных по данному ТП и предназначенных для применения в составе отказоустойчивой аппаратуры доверенного назначения. В результате исследования ряда типовых образцов СВЧ ИС установлено, что уровень воздействия (Р), при котором возникает ТЭ, составляет от $10^9$ до $10^{12}$ ед./с, а критичными функциональными блоками являются элементы защиты от электростатического разряда и зарядно-разрядный

блок [2]. В этой связи актуальной задачей является развитие расчетных методов прогнозирования возникновения ТЭ на этапах проектирования.

В настоящей работе представлен подход отработки методики расчетно-экспериментального восстановления параметров модели паразитной тиристорной структуры (ТС), предназначенной для применения в составе систем схемно-топологического проектирования. Эквивалентная схема (ЭС) модели ТС показана на рис. 1*а* [4]. Для экспериментальных исследований выбран специализированный тестовый кристалл с паразитной ТС, топология которого показана на рис. 1*б* (вставка). Определены ключевые параметры ЭС ТС: значения сопротивлений $R_{wN}$ и $R_{sP}$, учитывающие разности потенциалов между истоками МОП-транзисторов и контактами к подложке и карману: $R_{wN}$ ~ 20 Ом и $R_{sP}$ ~ 40 Ом, а также значения коэффициентов передачи тока эмиттера ($\alpha$) паразитных биполярных транзисторов, которые составили 0,94 и 0,72 соответственно. На основе полученных значений была проведена аналитическая оценка зависимости ионизационного тока (Iion) от P, показанная на рис. 1*б* и подтверждающая справедливость предложенной модели.




*а* *б*

**Рис. 1.** Эквивалентная схема ТС (*а*) и зависимость ионизационного тока Iion от уровня воздействия P (*б*), вставка — внешний вид ТК ТС

***Литература***

1. Кузнецов А. Г., Елесин В. В., Усачев Н. А., Сотсков Д. И., Жидков Н. М., Будяков А. С., Савченко Е. М. Тиристорный эффект в SiGe БиКМОП СВЧ ИС (SG-B25V): критичные фрагменты и параметры // Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» — «Стойкость-2019». — С. 238–239.
2. Елесин В. В., Сотсков Д. И., Усачев Н. А. и др. Радиационно-ориентированная и СВЧ-характеризация техпроцессов контрактного производства ЭКБ ТСВЧЭ, используемых отечественными ДЦ: состояние, проблемы и ближайшие задачи // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — С. 423–425.
3. Елесин В. В., Громов Д. В., Чуков Г. В. и др. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики кремний-германиевых интегральных схем СВЧ диапазона / Микроэлектроника, 2010. — Т. 39. — № 2. — С. 136–148.
4. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чумаков А. И. Радиационные эффекты в КМОП ИС // Радио и связь, 1994. — 164 с.

УДК 621.382.002 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.293.296

# Сравнительный анализ подходов к контролю радиационной стойкости ЭКБ в ходе ОКР и серийного производства

## Comparative Analysis of Approaches to Control the Radiation Resistance of the ECB During the OCP and Serial Production

**Московская Ю. М.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*ymmos@spels.ru*

**Moskovskaya Yu. M.**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*ymmos@spels.ru*

Проведен сравнительный анализ подходов к контролю радиационной стойкости изделий микроэлектроники в ходе разработки изделия на этапе ОКР и в процессе серийного производства.
**Ключевые слова:** радиационная стойкость; ОКР; технологический процесс; тестовые структуры; партии пластин.

Контроль радиационной стойкости (РС) в ходе ОКР и серийного производства решает разные задачи.

Задача оценки РС в ходе ОКР — установить, соответствует ли изделие требованиям ТЗ, а также определить запасы значений параметров — критериев годности изделия относительно заданных требований. Таким образом, испытания, как правило, имеют определительный характер. На этапе ОКР суть контроля РС — получение максимально полной информации о радиационном поведении объекта по всем параметрам — критериям годности (ПКГ) в типичных и наиболее критичных режимах и условиях согласно ТЗ. Поэтому состав и объем испытаний выбираются на основании требований ТЗ и включают испытания по подгруппам К22 — К25 в соответствии с ОСТ В 11 0998.

На этапе серийного производства решаются две задачи:

- статистическое регулирование базового технологического процесса (БТП) — проверка стабильности выхода годных и распределение брака по видам и причинам в технологическом процессе;
- испытания производственных партий пластин на радиационную стойкость по группе Е.

Испытания партий пластин имеют контрольный характер и являются составной частью технологического процесса изготовления изделия. В соответствии с ОСТ В 11 0998 на этапе серийного производства проводятся испытания на стойкость ИС по эффектам мощности дозы, по дозовым ионизационным эффектам

и эффектам структурных повреждений. В случае любой конструктивно-топологической коррекции изделия дополнительно проводятся типовые испытания по подгруппам К22 — К25, так как любое изменение в изделии, начиная с изменения исходного материала, может привести к существенному (до нескольких порядков) изменению РС изделия.

Различия подходов к контролю РС в ходе ОКР и в серийном производстве складываются также из различия входной информации, которая имеется на момент разработки программы, и методики проведения испытаний и/или плана контроля.

Программа — методика испытаний в ходе ОКР разрабатывается на основе требований ТЗ с учетом категорий стойкости [1] и наихудших режимов и условий работы в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.57.415.

На этапе серийного производства на основании данных, полученных в ходе радиационно-ориентированной характеризации (РОХ) [2–4], разрабатывается план статистического регулирования базового технологического процесса (БТП) на основе оценки наиболее критичных базовых элементов (включаются в состав параметрических мониторов — ПМ), библиотечных элементов, а также функциональных блоков (включаются в состав структур контроля технологии — С.Т).

В ходе разработки плана контроля производственных партий по группе Е и программы — методики испытаний учитывается информация, полученная в процессе РОХ БТП и на предварительных испытаниях на этапе разработки изделия, а именно:

- выявленные в процессе предварительных испытаний доминирующие радиационные эффекты;
- перечень наиболее критичных ПКГ, режимов и условий работы с учетом зависимостей критичных параметров от накопленной дозы и мощности дозы;
- разбросы характеристик РС по партии.

Таким образом, можно сказать, что на этапе ОКР-объектом контроля является вновь разрабатываемое изделие, а на этапе серийного производства — сам БТП, гарантирующий неизменность полученных в ходе ОКР характеристик РС, а также производственные партии серийно изготавливаемого изделия.

Таким образом, на этапе ОКР объектом испытаний является опытный образец изделия, а на этапе серийного производства — тестовые структуры — имитаторы изделия:

1) тестовые структуры статистического контроля параметров технологического процесса (ПМ, СКТ) с точки зрения РС;
2) тестовые структуры контроля производственных партий пластин конкретного изделия по подгруппе Е — типовые оценочные схемы (ТОС).

Тестовые структуры, разработанные на этапе РОХ, рационально использовать для статистического контроля параметров БТП с точки зрения РС, однако они имеют избыточный состав как по элементарным ячейкам (ПМ), так и по составу библиотечных элементов и блоков (СКТ), поэтому на основе информации, полученной в ходе РОХ, в технологической документации необходимо предусмотреть контроль только наиболее информативных с точки зрения радиационной чувствительности параметров тестовых структур. В случае выявления несоответствия текущей партии требуемым значениям параметров целесообразно проводить расширенный контроль тестовых структур для анализа причин брака.

Контроль производственных партий по подгруппе Е проводится на самом изделии или на его «имитаторе», который выбирается в ходе ОКР, — типовой оценочной схеме (ТОС). Если в результате анализа установлено, что СКТ, разработанная в результате РОХ, является репрезентативной для оценки РС нового изделия, то целесообразно применять ее в качестве ТОС для контроля производственных партий пластин. Однако если в составе нового изделия задействованы лишь выборочные (не все) библиотечные элементы, то в качестве ТОС следует принять лишь эту задействованную часть СКТ и проигнорировать ту ее часть, которая не задействована в изделии. При этом уровень РС готового изделия, полученный по результатам испытаний ТОС, может быть существенно выше, чем нормативный (гарантированный) уровень, обеспечиваемый БТП и определяемый по СКТ в целом — в случае отсутствия в изделии наиболее радиационно-критичных библиотечных элементов, например источников опорного напряжения, прецизионных аналоговых или аналого-цифровых элементов [5].

Вместе с тем если выявляются критичные особенности радиационного поведения нового изделия, не учитываемые СКТ (например, за счет взаимного влияния библиотечных элементов), то в качестве ТОС для контроля производственных партий пластин используется либо доработанная СКТ, учитывающая отмеченные особенности, либо само изделие. Если испытания СКТ и ТОС показали отсутствие запаса по уровню РС изделия, указанного в ТУ, то для обеспечения гарантий потребителям также целесообразно проводить испытания производственных партий пластин на самих изделиях.

Мероприятия по обеспечению и контролю РС изделий микроэлектроники должны проводиться взаимосвязанно на всех этапах жизненного цикла изделий — при разработке, производстве и поставке (эксплуатации). При этом конечным результатом контроля РС ЭКБ в ходе ОКР является комплект конструкторской и технологической документации, обеспечивающий изготовление конкретных типов микросхем, а также набор методов и средств контроля качества проекта, включая тестовые элементы и опытные образцы, опробованные в серийном производстве путем выпуска опытной образцов изделия и проведения предварительных (квалификационных) испытаний.

Объектом поставки на этапе серийного производства являются партии микросхем, имеющие параметры, определенные в ходе ОКР, соответствующие НД и гарантирующие сохранение свойств изделия, в том числе и при радиационных воздействиях на всех этапах и во всех режимах и условиях эксплуатации, при этом разброс параметров должен соответствовать параметрам стабильности БТП от партии к партии [6].

***Литература***

1. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В. Требование радиационной стойкости — экзотика для гурманов или гарантия наличия и технического уровня результата разработки для всех категорий потребителей ЭКБ? / Форум «Микроэлектроника-2017», Республика Крым, г. Алушта, 2–7 октября 2017 г. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2017. — С. 32–36.

2. Елесин В. В., Сотсков Д. И., Усачев Н. А., Кузнецов А. Г., Селецкий А. В., Фазылханов О. Р., Филаретов А. Г. Радиационно-ориентированная и СВЧ-характеризация техпроцессов контрактного производства ЭКБ ТСВЧЭ, используемых отечественными ДЦ: состояние, проблемы и ближайшие задачи // Международная конференция «Микроэлектроника-2020», 2020. — С. 423–425.
3. Елесин В. В., Усачёв Н. А., Никифоров А. Ю., Телец В. А., Сотсков Д. И., Кузнецов А. Г., Чуков Г. В., Щепанов А. Н. Базовая технология проектирования широкой номенклатуры изделий СВЧ-диапазона вида «система на кристалле» и «система в корпусе», ориентированной на отечественные кремниевые и арсенид-галлиевые контрактные производства: достижения, проблемы и ближайшие задачи // Международная конференция «Микроэлектроника-2019», 2019. — С. 28–31.
4. Sotskov D. I., Elesin V. V., Kuznetsov A. G., Zhidkov N. M., Metelkin I. O., Amburkin K. M., Amburkin D. M., Usachev N. A., Boychenko D. V., Elesina V. V. Displacement Damage Effects Mitigation Approach for HBT RF Frequency Synthesizers // IEEE Transactions on Nuclear Sciences, RADECS 2020 special issue, 2020. P. 2396–2404.
5. Московская Ю. М., Денисов А. Н., Федоров Р. А., Никифоров А. Ю., Уланова А. В., Бобровский Д. В. Состав и принцип формирования типовой оценочной схемы для оценки радиационной стойкости базовых матричных кристаллов и полузаказных БИС на их основе // Наноиндустрия, 2017. — Выпуск 1. — С. 60–69.
6. ОСТ 11 14.1011 Стандарт отрасли. Микросхемы интегральные. Система и методы статистического контроля и регулирования технологического процесса. — Изд-во Минобороны. ОСТ 11 0999-99 Обеспечение качества в процессе разработки. Требования к системе качества разработки. — Изд-во Минобороны.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.297.299

# Что нужно разработчику космической аппаратуры для противодействия одиночному тиристорному эффекту

## What is Needed by the Developer of Space Equipment to Counteract a Single Thyristor Effect?

**Яненко А. В., к. т. н., Печенкин А. А., к. т. н., Савченков Д. В., к. т. н.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*AVYanenko@mephi.ru, DVSavchenkov@mephi.ru*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*aapech@spels.ru*

**Yanenko A. V., Ph.D, Pechenkin A. A., Ph.D, Savchenkov D. V., Ph.D**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*AVYanenko@mephi.ru, DVSavchenkov@mephi.ru*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*aapech@spels.ru*

Опыт наблюдения одиночных тиристорных эффектов (ТЭ) при проведении испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) в АО «ЭНПО СПЭЛС» позволил сформулировать рекомендации для разработчиков аппаратуры по разработке мер предотвращения одиночного отказа в результате развития одиночного ТЭ.

**Ключевые слова:** тяжелые заряженные частицы; высокоэнергетичные протоны; бортовая космическая аппаратура; одиночный тиристорный эффект; методы парирования; микросхема радиационной защиты; одиночный отказ; КМОП электронная компонентная база.

Проектирование электронной аппаратуры космических аппаратов требует применения современной ЭКБ, при этом часто возникает ситуация, когда запланированная к применению ЭКБ оказывается несоответствующей заданным требованиям по радиационной стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетичных протонов (ВЭП) космического пространства (КП) по одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) [1]. Наиболее опасными ОРЭ являются одиночные отказы (ОО) и тиристорные эффекты (ТЭ). Возникновение ОО подразумевает выход из строя изделия ЭКБ при возникновении ОРЭ, поэтому противодействие ОО основывается на применении методов резервирования. Одиночные ТЭ, как считается, не являются однозначно катастрофическими. Действительно, так как одиночный ТЭ обусловлен включением паразитной тиристорной структуры (ТС), шунтирующей внутренние шины питания на кристалле КМОП интегральной микросхемы (ИМС), то отключение питания приведет к выключению тиристорной структуры.

Ошибочная точка зрения, что одиночные ТЭ всегда можно парировать, распространена из-за недостаточного понимания особенностей проявления одиночного ТЭ в ИМС:

- в кристалле ИМС может быть множество различных по электрическим параметрам ТС;
- при воздействии ТЗЧ и ВЭП включается одна из ТС, при этом плотности тока по внутренним шинам и ток потребления ИМС будут зависеть от параметров конкретной ТС, напряжения питания и температуры;
- безопасное время выдержки ИМС в состоянии одиночного ТЭ до отключения питания зависит от плотностей тока во внутренних шинах;
- параметры ТС являются паразитными и не контролируются в процессе производства, это приводит к возможности различного поведения одинаковых кристаллов из разных партий пластин.

Так как поведение ИМС при развитии одиночного ТЭ будет определяться параметрами внутренних элементов кристалла ИМС, прямой контроль которых невозможен, то безопасное время выдержки и возможные токи потребления ИМС в состоянии одиночного ТЭ могут быть определены только экспериментально. При этом наиболее эффективным является использование сфокусированного лазерного излучения, позволяющего отдельно воздействовать на каждую ТС кристалла ИМС и включать их все поочередно.

Распространенным методом регистрации и парирования ТЭ является контроль тока потребления и отключение питания при превышении заданного порогового уровня [2]. Специально разработанные для применения в условиях КП стойкие микросхемы радиационной защиты [3] позволяют защищать от одной до нескольких ИМС. Недостатком такого подхода является фиксированный порог срабатывания, не учитывающий дозовую деградацию и зависимость распределения токов потребления в состоянии ТЭ от режима работы ИМС. Вследствие этого значительная часть возникающих ТЭ не будут парированы. Решением в данном случае является построение интеллектуальных систем регистрации тока потребления, позволяющих подстраивать порог срабатывания в зависимости от режима работы. Системы на кристалле с такими функциями и высокими показателями стойкости к воздействию ТЗЧ и ВЭП КП в настоящее время отсутствуют.

Опыт наблюдения одиночных ТЭ при проведении испытаний изделий ЭКБ в АО «ЭНПО СПЭЛС» показывает, что около 1/3 ИМС, в которых проявляется одиночный ТЭ при воздействии ТЗЧ и ВЭП, необратимо отказывают за время до 1 с выдержки в состоянии одиночного ТЭ. В некоторых случаях отказ, обусловленный броском тока в момент включения тиристорной структуры, наступает за время менее 10 мс. Противодействие такому «быстрому» отказу при ТЭ возможно введением дополнительных резисторов в цепь питания, которые снижают бросок тока в начальной фазе развития ТЭ [4].

Таким образом, разработчику космической аппаратуры для успешного противодействия одиночному ТЭ требуется:

- экспериментально получить информацию о проявлении ТЭ в ИМС;
- разработать систему парирования ТЭ, комбинирующую различные методы парирования ТЭ и противодействия отказу;
- провести экспериментальное апробирование принятых мер парирования ТЭ, в том числе в диапазоне рабочих напряжений питания и температур.

***Литература***

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы / Чумаков А. И. — М.: Радио и связь, 2004. — 319 с. : ил., табл.; 22 см. ISBN 5-256-01745-4.
2. Петух Н. Н. Схемотехническое решение парирования тиристорного эффекта в бортовых изделиях космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018. — Т. 5. — Вып. 3. — С. 45–51. [Электронный ресурс]. URL: http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2018/10/5_p45_0503.pdf.
3. Коняхин В., Фёдоров Р. Микросхема защиты от тиристорного эффекта. Военные и космические технологии. — М.: НПК «Технологический Центр», 2016. — № 7. — 69–75.
4. Тараракси́н А. С., Нигматуллин Р. Р., Савченков Д. В., Соловьев С. А., Яненко А. В. Методики исследования и предотвращения развития катастрофического отказа вследствие одиночного тиристорного эффекта. — М.: МЭС, 2012. — С. 628–633.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.300

# Физическое моделирование экстремальных событий при взаимодействии одиночных заряженных частиц с материалом современных интегральных микросхем

## Modeling Extreme Events at Heavy Ion Interaction with Modern Intergrated Circuit Material

**Галимов А. М., Короченко Д. И., Гуков А. И., Фатеев И. А.**
*АО «НИИМА «Прогресс»*
*125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54*

**Galimov A. M., Korochenko D. I., Gukov A. I., Fateev I. A.**
*Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC*
*("PROGRESS MRI" JSC)*
*54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia*

В докладе представлены результаты моделирования ядерного взаимодействия одиночных заряженных частиц с материалом микросхемы. Показано, что вторичные частицы от данного типа взаимодействия могут повлиять на эффективность систем парирования сбоев в интегральных микросхемах.
**Ключевые слова:** одиночные заряженные частицы; системы парирования; Geant4; инжектирование ошибок.

The paper presents the modeling results of heavy ion nuclear interaction. It has been shown that secondary ions may potentially threat the correction system of modern integrated circuits.
**Keywords:** heavy ions; correction systems; Geant4; fault injection.

На практике оценка сбоеустойчивости интегральных микросхем традиционно сводится к расчету частоты сбоев. Предполагается, что возникновение сбоев в микросхеме во время эксплуатации является пуассоновским стохастическим процессом. Частота сбоев при этом характеризует математическое ожидание данного процесса. Как правило, данная величина является единственной исходной информацией для разработчика систем парирования сбоев. Однако при разработке систем ответственного применения такой подход не позволяет достаточным образом минимизировать риски. В частности, в данной работе рассмотрены механизмы ядерного взаимодействия одиночных заряженных частиц, эффекты от которых не учитываются при стандартном прогнозировании сбоеустойчивости. Данные события являются крайне редкими, однако эффект от них может быть катастрофическим (экстремальные события). Например, при таких взаимодействиях образуется ряд вторичных частиц, которые способны единовременно инвертировать состояния пространственно удаленных друг от друга ячеек памяти. С помощью моделирования Монте-Карло в среде Geant4 получены сценарии возникновения таких событий.

В настоящее время на этапе проектирования используется метод инжектирования ошибок, который позволяет достоверно оценить эффективность систем парирования. При этом типовым сценарием является последовательное внесение одиночных ошибок в триггеры или биты памяти. В данной работе предлагается использовать полученные в Geant4 сценарии для оценки поведения системы парирования при возникновении экстремальных событий.

УДК 621.384 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.301.303

# Практические аспекты проведения испытаний микросхем АЦП на стойкость к воздействию ТЗЧ

## Practical Aspects of the ADC Microchips Testing on Resistance to the TZCh Effects

**Торшин Р. С., Сорокоумов Г. С., Бобровский Д. В., Калашникова М. О.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*rstor@spels.ru, gssor@spels.ru, dvbob@spels.ru, mokal@spels.ru*

**Torshin R. C., Sorokoumov G. S., Bobrovskiy D. V., Kalashnikova M. O.**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*rstor@spels.ru, gssor@spels.ru, dvbob@spels.ru, mokal@spels.ru*

В работе приведены основные аспекты контроля одиночных радиационных эффектов в микросхемах АЦП при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).

**Ключевые слова:** АЦП; одиночный сбой; функциональный сбой; ТЗЧ; радиационная стойкость.

Современные микросхемы АЦП являются ключевыми элементами в системах сбора данных, телекоммуникации, спектрального анализа, радиолокации и автоматического управления. Аналого-цифровые преобразователи, применяемые в аппаратуре бортовых систем космических аппаратов, подвергаются воздействию различных факторов космического пространства, одним из наиболее существенных является воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) [1].

Ниже представлены одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), возникающие в микросхемах АЦП при воздействии заряженных частиц:

- тиристорный эффект (single-event latch-up — SEL);
- одиночный сбой (single-event upset — SEU);
- функциональный сбой (single-event functional interrupt — SEFI);
- переходный процесс (single event disturb transient — SET);
- катастрофический отказ.

Особенность одиночных сбоев в микросхемах АЦП при воздействии заряженных частиц заключается в том, что помимо сбоев в цифровой части (SEU) вследствие генерации заряда создаются сдвиги напряжения, которые могут быть многократно усилены и приводить к существенной деградации сигнала на выходе аналоговой части схемы (SET). Таким образом, помимо сбоев в конфигурационных регистрах (или калибровочном ОЗУ), возможны два типа сбоев в микросхемах АЦП — цифровые и аналоговые. В обоих случаях в результате формируется ошибочный цифровой код на выходах АЦП [2].

Контроль точностных параметров АЦП при воздействии ТЗЧ для оценки сбоеустойчивости не имеет физического смысла из-за длительной процедуры преобразования и невозможности на характеристике преобразования, полученной методом гистограмм, отличить одиночные события неверного преобразования. Контроль выбранных параметров — критериев годности осуществляется до и после испытательного воздействия, а также в промежуточных технологических операциях для контроля КО [3].

Различить аналоговые и цифровые сбои можно по распределению выходных величин (код АЦП при постоянном входном напряжении). Если сбои происходят в аналоговой части, ошибки группируются вокруг ожидаемой величины по нормальному распределению и могут быть представлены источником шума на входе. Если же сбои вызваны попаданием частиц в цифровые узлы, то будут наблюдаться выходные величины с большим отклонением от ожидаемой [4]. На рис. 1 показано распределение выходных кодов 12-разрядного АЦП при облучении заряженными частицами, где видны пики аналоговых и цифровых сбоев.

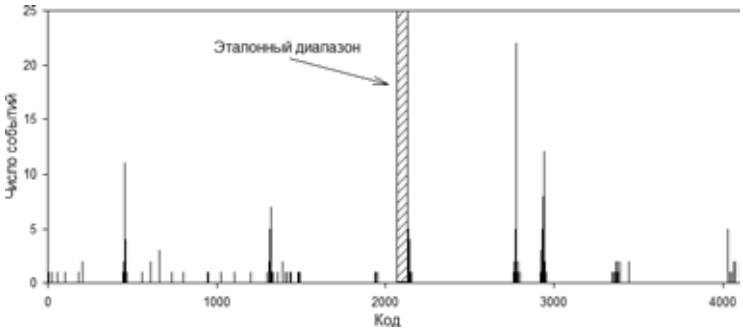



**Рис. 1.** Гистограмма регистрации сбоев в микросхеме 12-разрядного АЦП после воздействия ТЗЧ для значения входного сигнала, соответствующего середине шкалы преобразования АЦП

В общем случае чувствительность микросхемы может отличаться в зависимости от уровня входного сигнала. Проведение оценок для входного сигнала с шагом 1 МРЗ нецелесообразно из-за кратного роста продолжительности эксперимента. Рекомендуется проведение оценок для трех значений входного напряжения: вблизи краев шкалы преобразования (5–10 % от края шкалы) и в середине шкалы преобразования, как наиболее характерных точках, в которых может наблюдаться максимум отличий в параметрах чувствительности.

Контроль ОС в конфигурационных регистрах (или калибровочном ОЗУ) (SEU и SEFI) проходит следующим методом: перед началом облучения в конфигурационные регистры микросхемы, доступные по записи и чтению, записывается эталонная информация. Микросхема облучается в режиме циклического считывания информации, хранящейся в указанных регистрах или ОЗУ. После считывания информации проводятся сравнение с эталоном и подсчет количества сбившихся битов. В случае если считанная информация отличается от эталона, проводится перезапись информации регистра или корректировка эталона.

Регистрация ТЭ осуществляется по стандартной методике по критерию резкого роста тока потребления выше установленного порога.

***Литература***

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. — М.: Радио и связь, 2004. — 319 с. : ил., табл.; 22 см.; ISBN 5-256-01745-4.
2. Kalashnikov O. A. et al. Integrating analog-to-digital converter radiation hardness test technique and results // IEEE Transactions on Nuclear Science, Dec. 1998. Vol. 45. № 6. P. 2611–2615. DOI: 10.1109/23.736504.
3. Torshin R. S. et al. Measurement of Parameters of Analog-to-Digital Converters Based on the NI Hardware-Software Complex in the Course of a Radiation Experiment // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438886.
4. Scheick L., Allen G. and Edmonds L. Single-event effect qualification of 24-bit analog-to-digital converters // IEEE Radiation Effects Data Workshop, San Francisco, CA, 2013.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.304.306

# Концепция обеспечения радиационной стойкости КМОП КНИ технологических процессов

## The Concept of Ensuring the Radiation Tolerance of CMOS SOI Technological Processes

**Селецкий А. В.[1], к. т. н., Шелепин Н. А.[1], д. т. н., Мещанов В. Д.[2], к. т. н., Уланова А. В.[3], к. т. н.**
*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*aseletskiy@niime.ru*
*[2] ООО «СИТРОНИКС-МИКРОДИЗАЙН»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*[3] АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

**Seletskiy A. V.[1], Ph.D, Shelepin N. A.[1], Sc.D, Meshchanov V. D.[2], Ph.D, Ulanova A. V.[3], Ph.D**
*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] "Sitronics-MD" LLC*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*[3] "ERPA SPELS" JSC*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*

В работе описаны основные проблемы обеспечения стабильного уровня радиационной стойкости микросхем, изготавливаемых по КМОП КНИ-процессам. Обозначены основные причины разброса радиационной стойкости и сформулирован подход к обеспечению стабильного уровня качества отечественных КНИ-процессов.
**Ключевые слова:** радиационная стойкость; КМОП КНИ.

The paper describes the main problems of ensuring a stable level of radiation tolerance of microcircuits manufactured by CMOS SOI processes. Besides, it studies main reasons for the spread of radiation tolerance and formulates an approach to ensuring a stable quality level of domestic SOI processes.
**Keywords:** radiation tolerance; CMOS SOI.

Радиационно стойким (РС) является технологический процесс, позволяющий выпускать ИМС стабильно уровня РС. Единичная микросхема с предельно высоким уровнем РС не является гарантией, что иная микросхема, изготовленная в том же техпроцессе, повторит результаты. Справедливо и обратное — микросхема с уровнем стойкости менее 1Ус не делает процесс непригодным для изготовления РС-схем. Например, операционный усилитель, состоящий из 10–100 элементов, и СОЗУ из более чем миллиона элементов, изготовленные на одной фабрике, будут иметь существенно отличающийся уровень РС ввиду параметрических запасов и режимов функционирования.

Оптимальным подходом к обеспечению РС готовых изделий является использование набора конструктивно-технологических приемов, позволяющих добиться отсутствия катастрофических и параметрических отказов, однако для их использования частота и скорость проявления радиационных эффектов должны быть стабильны и предсказуемы. Таким образом, РС-технология должна обеспечивать воспроизводимость радиационной чувствительности и ее объективный контроль.

Опыт АО «НИИМЭ» по разработке РС ИМС на базе технологии КМОП КНИ с проектными нормами 180 нм показал следующее [1, 2]:

- изменение качества исходных КНИ-подложек способно привести к неконтролируемому снижению РС до десяти раз;
- количество слоев металлизации от четырех до шести может существенно ухудшить характеристики скрытого оксида, что было установлено исследованиями методом времязависимого пробоя;
- в транзисторах периферии, имеющих толщину подзатворного диэлектрика более 10 нм, имеется эффект радиационно-индуцированного существенного уменьшения порогового напряжения. Влияние на транзисторы ядра с толщиной подзатворного диэлектрика порядка 3 нм существенно ниже и в основном приводит к увеличению утечек.

Вышеописанные эффекты имеют разброс, обусловленный технологией, и не поддаются стандартному контролю воспроизводимости путем измерения электрических параметров тестовых структур.

Таким образом, можно выделить основные пути обеспечения РС КМОП КНИ-процессов, а именно [3, 4]:

1) использование «сверхчистых» исходных материалов — КНИ-подложек, содержащих минимально возможное количество структурных дефектов приборного слоя, скрытый оксид с предельно низкой концентрацией объемных ловушек и т. д.;
2) оптимизация технологического процесса — выращивание низкодефектных диэлектриков, оптимизация профиля легирования кармана, снижение влияния плазмохимического травления и т. д.;
3) обеспечение контроля стабильности всех радиационно-чувствительных параметров. Обеспечивается физическим контролем исходных КНИ-пластин и контролем радиационной стойкости типовых оценочных схем в составе параметрического монитора.

Ввиду отсутствия универсальных методик для реализации концепции обеспечения РС-технологии КМОП КНИ необходимо осуществление следующих научно-технических мероприятий:

1) проведение НИР по поиску технологических путей снижения дефектности и радиационной чувствительности КНИ-подложек;
2) проведение НИР по исследованию влияния технологического процесса на радиационную чувствительность и последующая оптимизация;
3) радиационная характеризация — определение типовых оценочных схем для контроля технологической устойчивости РС технологического процесса и экстракция параметров радиационной чувствительности. Разработка методов контроля и учет влияния радиационного воздействия на этапе проектирования на параметры элементной базы.

***Литература***

1. Уланова А. В., Швецов-Шиловский И. И., Горбунов М. С., Селецкий А. В., Шелепин Н. А., Акишина Н. В. Влияние технологических изменений на уровень дозовой стойкости СОЗУ, изготовленных по КМОП КНИ // Тезисы докладов 24-й Всероссийской конференции «Радиационная стойкость электронных систем», 2021. — С. 139–140.
2. Горбунов М. С., Котов В. Н., Кузнецов А. Г., Швецов-Шиловский И. И., Смолин А. А., Уланова А. В., Селецкий А. В., Шелепин Н. А. Доминирующие эффекты накопленной дозы в транзисторах А-типа 0,18 мкм КНИ КМОП-технологии // Тезисы докладов 24-й Всероссийской конференции «Радиационная стойкость электронных систем», 2021. — С. 141–142.
3. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011.
4. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В. Структурно-примесные комплексы в системе кремний — диоксид кремния // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2000. — № 3. — С. 39–47.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.307.310

# Исследование чувствительной области КНИ МОП-транзистора к воздействию вторичных частиц, возникающих вследствие облучения нейтронами

## Investigation of the Sensitive Field of KRS MOS-Transistor to the Effects of Secondary Particles Arising from Neutron Irradiation

**Чистяков М. Г.[1], Глушко А. А.[1,2], к. т. н., Морозов С. А.[1]**
*[1] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*
*[2] МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*

**Chistyakov M. G.[1], Glushko A. A.[1,2], Morozov S. A.[1]**
*[1] SRISA RAS*
*bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218*
*[2] Bauman MSTU*
*bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005*

Исследована зависимость возникновения сбоев ячейки статической оперативной памяти от координаты возникновения вторичной частицы в результате воздействия нейтронного облучения. Предложен метод анализа накопленных зарядов для оценки сбоеустойчивости ячейки статической оперативной памяти в зависимости от координаты возникновения вторичной частицы и критического заряда, соответствующего статическому запасу помехоустойчивости. Анализ проводился на основе результатов приборно-технологического моделирования одиночного МОП-транзистора, входящего в состав ячейки статической оперативной памяти, и интегрирования полученных значений токовых откликов.

**Ключевые слова:** TCAD; быстрые нейтроны; СОЗУ; КНИ МОП.

Вопросы радиационной стойкости являются чрезвычайно важными с позиции проектирования сбоеустойчивой аппаратуры. Разработка сбоеустойчивой аппаратуры, обеспечивающей требования по снижению массогабаритных параметров, невозможна без обеспечения сбоеустойчивости электронных компонентов. Наиболее чувствительными к сбоям электронными компонентами являются интегральные микросхемы. Сбои в цифровых микросхемах происходят при ложном срабатывании транзистора, поэтому в качестве объекта исследования был выбран одиночный КНИ МОП-транзистор, входящий в состав ячейки статической оперативной памяти. В качестве фактора, из-за которого происходит нарушение функционирования устройства, было рассмотрено воздействие потока быстрых нейтронов.

Исследования, посвященные одиночным сбоям, возникающим вследствие воздействия быстрых нейтронов, описаны в работах [1, 2, 3]. В частности, в работе [3] проведено сопряжение системы приборно-технологического моделирования с системой моделирования радиационного транспорта. В этой работе критерием отбора событий являлся критерий максимума энергии вторичной частицы, а под

чувствительной областью подразумевалась вся область, для которой проводилось моделирование. Это приводило к тому, что при дальнейшем моделировании ячейки памяти воздействия с одной и той же энергией показывали различные результаты. Как следствие, это приводило к необходимости проводить моделирование ячейки статической оперативной памяти для случаев, когда транзисторы либо не подвержены влиянию, либо влияние пренебрежимо мало, а следовательно, и сбоев ячейки памяти наблюдаться не может. Из проведенных расчетов следует, что поведение ячейки памяти зависит не только от энергии попадающей частицы, но и от направления ее пролета, а также от координаты точки возникновения вторичной заряженной частицы в транзисторе. В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что чувствительной областью является не все тело транзистора, а лишь некоторая его часть.

Для проверки гипотезы было выполнено приборно-технологическое моделирование отдельного транзистора, входящего в состав ячейки статической оперативной памяти, при воздействии вторичной заряженной частицы, порожденной в результате ядерной реакции взаимодействия нейтрона с кристаллической решеткой кремния. В качестве примера рассмотрено воздействие атома кремния с линейной потерей энергии 0,07 пКл/мкм. Направление полета иона кремния и места возникновения вторичной частицы показаны на рис. 1.

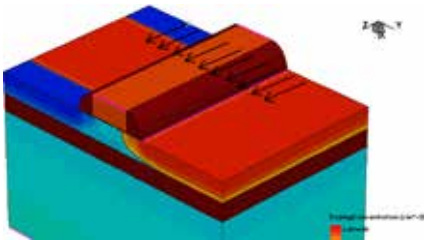


**Рис. 1.** Направление полета иона кремния

Направление полета иона кремния было выбрано параллельно затвору транзистора (ось Z, рис. 1). Начальная координата частицы варьировалась в направлении, перпендикулярном затвору транзистора (ось Y, рис. 1). В результате моделирования были построены семейства временных зависимостей токовых откликов транзистора с учетом начального положения. Токовые отклики были построены при нулевом смещении на затворе, а на сток было подано напряжение, соответствующее напряжению питания ячейки памяти. По временным зависимостям токовых откликов можно определить накопленный заряд, полученный в результате воздействия вторичной заряженной частицы [4].

Помимо вышеописанного, для проверки гипотезы также была рассчитана величина статического запаса помехоустойчивости (SNM) и соответствующий ей заряд [5, 6].

После этого для определения чувствительной области построены два графика — график зависимости накопленного заряда от начальной координаты вторичной частицы и график заряда, определенный по результатам анализа статического запаса помехоустойчивости, рис. 2.

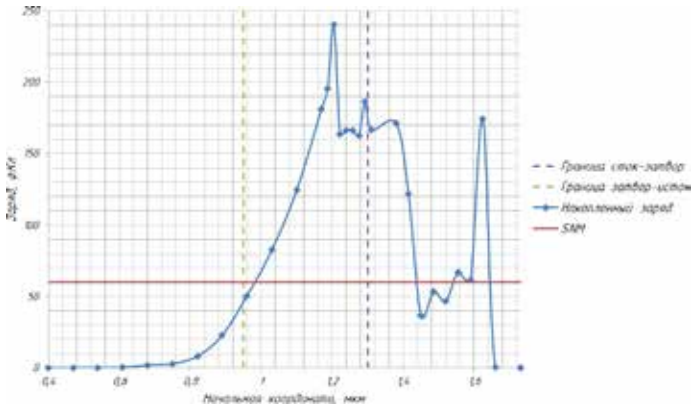



**Рис. 2.** Зависимость накопленного заряда от начальной координаты

Те величины накопленного заряда, которые больше величины запаса статической помехоустойчивости, соответствуют переключению ячейки памяти, а следовательно, сбою в режиме хранения информации. Те же величины накопленного заряда, которые меньше величины заряда статического запаса помехоустойчивости, соответствуют бессбойной работе ячейки памяти, а следовательно, и корректному режиму хранения информации.

Так как каждому значению накопленного заряда соответствует значение начальной координаты частицы, то можно сделать вывод: попадания в какие области будут приводить к сбою ячейки, следовательно, эти области и можно назвать чувствительными.

Таким образом, предложенная гипотеза является верной и ее можно использовать в качестве метода для определения чувствительных областей в теле транзистора. Аналогичные исследования авторы планируют провести для различных линейных потерь энергии в целях подтверждения гипотезы о пропорциональном изменении графика чувствительного заряда. Это необходимо для разработки методики оценки чувствительной области транзистора при воздействии вторичной заряженной частицы с произвольной потерей энергии и минимизации количества расчетов в системах приборно-технологического моделирования.

Авторы данной работы считают новой методику определения чувствительной области воздействия частиц для фильтрации большого количества событий, полученных методом Монте-Карло, и последующего моделирования ячейки памяти с использованием трехмерных приборно-технологических моделей.

***Литература***

1. Gordon M. S., Goldhagen P., Rodbell K. P., Zabel T. H., Tang H. H. K., Clem J. M., Bailey P. Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground // IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 51. Issue 6. December, 2004.

2. Batista A. J. N., Leong C., Santos B., Fernandes A., Ramos A. R., Santos J. P., Marques J. G., Teixeira J. P., Gonçalves B. Test results of an ITER relevant FPGA when irradiated with neutrons // 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), Lisbon, Portugal, 20–24 April 2015, IEEE.
3. Глушко А. А., Чистяков М. Г., Кудинов И. В., Морозов С. А., Яшин Г. А., Амирханов А. В., Макарчук В. В., Зинченко Л. А. Методика сопряжения Монте-Карло моделирования радиационного транспорта и приборно-технологического моделирования для исследования одиночных сбоев // Доклады Международного форума «Микроэлектроника-2018» 4-й научной конференции «Электронная компонентная база и электронные модули», Республика Крым, г. Алушта, 1–6 октября 2018 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА. — С. 292–293.
4. Dodd P. E., Sexton F. W. Critical Charge Concepts for CMOS SRAMs // IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 42. № 6. December, 1995.
5. Чистяков М. Г. Исследование и оптимизация по критерию сбоеустойчивости ячейки памяти для технологии КНИ КМОП 0,25 мкм при облучении быстрыми нейтронами // Доклады Международного форума «Микроэлектроника-2017» 3-й научной конференции «Электронная компонентная база и электронные модули», Республика Крым, г. Алушта, 2–7 октября 2017 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА. — С. 351–358.
6. Seevinck E., List F. J., Lohstroh J., Static-Noise Margin Analysis of MOS SRAM Cells // IEEE Journal of Solid-State Circuits, Volume Sc-22, № 5, October, 1987.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.311.313

# Инженерные методы учета низкой интенсивности космического пространства

## TID Engineering Test Methods for ELDRS

**Бойченко Д. В., к. т. н., Ахметов А. О., к. т. н., Калашников О. А., к. т. н., Лоскутов И. О., Никифоров А. Ю., д. т. н.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*aoahm@spels.ru*

**Boychenko D. V., Ph.D, Akhmetov A. O., Ph.D, Kalashnikov O. A., Ph.D, Loskutov I. O., Nikiforov A. Y., Ph.D**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*aoahm@spels.ru*

Представлены инженерные методики испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ), выполненной по КМОП- и биполярной (или БиКМОП) технологиям, с учетом длительного воздействия низкоинтенсивного (НИ) облучения космического пространства. Методики позволяют сократить выборку образцов ЭКБ, необходимую для испытаний, а также трудозатраты на проведение испытаний. Рассмотрены области применения и общие алгоритмы методики.
**Ключевые слова:** ELDRS; низкая интенсивность; ионизирующее излучение космического пространства.

The paper presents TID engineering methods for CMOS and bipolar (or BiCMOS) IC's testing, taking into account the long-term exposure to low-intensity (ELDRS) radiation of outer space. The methods allow to reduce IC's samples (DUT) required for radiation test, as well as the labor costs for conducting tests. The fields of application and general algorithms of the methodology are considered.
**Keywords:** ELDRS; low intensity; outer space ionizing radiation.

Испытания к воздействию ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП) по дозовым эффектам зачастую проводят при «средней» или «высокой» интенсивности воздействия 1–300 рад(Si)/с либо при условно «низкой» интенсивности 0,01 рад(Si)/с. Однако реальная интенсивность ИИ КП по дозовым эффектам для ЭКБ в БРЭА на несколько порядков ниже интенсивности 0,01 рад(Si)/с [1]. Испытания ЭКБ в условиях НИ (0,01 рад(Si)/с и менее) являются трудозатратными и зачастую экономически неэффективными. Эффекты низкой интенсивности учитываются в действующих методиках [2, 3, 4], но они имеют ряд недостатков: необходимость проведения отжига после испытаний для КМОП ЭКБ; дополнительные коэффициенты для нормы испытаний; испытания при повышенной температуре 100 °С, что неприемлемо для ЭКБ с меньшей рабочей

температурой; неоднозначность трактовки результатов [5] — существующие методы являются «контрольными» и не предназначены для определения уровня стойкости.

В работе представлены инженерные методики испытаний ЭКБ на основе КМОП- и биполярной (БиКМОП) технологий к воздействию ИИ КП по дозовым эффектам с учетом длительного воздействия низкоинтенсивного облучения. Предложенные методики позволяют уменьшить выборку образцов ЭКБ, которые необходимо облучать при «низкой» (0,01 рад(Si)/с) интенсивности воздействия, что существенно сокращает время проведения испытаний. Суть методик заключается в последовательном снижении интенсивности воздействия от ~10–100 рад(Si)/с до 0,01 рад(Si)/с и анализе уровней стойкости, полученных при различных интенсивностях воздействия.

***Литература***

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. — М.: Радио и связь. — 204–320 с.
2. ОСТ 134-1034-2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.
3. РД В 319.03.37-2000. Изделия электронной техники. микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Инженерные методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию низкоинтенсивного протонного и электронного излучений космического пространства.
4. MI-STD-883H — Ionizing radiation (total dose) test procedure. Department of Defense. Test method standard. Microcircuits, 2010. 729 с.
5. Pease R. and Seiler J. Evaluation of MIL-STD-883/Test method 1019.6 for bipolar linear circuits // Subm. to J. of Radiation Effects: Research and Engineering, 2005.

Ionizing radiation test methods for the outer space dose effects are often carried out at an “average” or “high” exposure intensity of 1–300 rad(Si)/s or at a conditionally “low” intensity of 0,01 rad(Si)/s. However, the real space radiation intensity in terms of dose effects for IC’s in spacecraft is several orders of magnitude lower than the intensity of 0.01 rad (Si)/s [1]. IC’s tests with low dose rate (0.01 rad (Si)/s or less) are labor-intensive and often economically inefficient. ELDRS are taken into account in the current methods [2, 3, 4], but they have a number of disadvantages: annealing after CMOS IC’s tests; additional coefficients for the test norm; high temperature (100 °C) radiation test, which is unacceptable for IC’s with a lower operating temperature; ambiguity in the interpretation of the results [5] — the existing methods are “control” only and are not intended to determine the failure dose.

The paper presents engineering methods for IC’s testing made by CMOS and bipolar (BiCMOP) technologies for the ELDRS effects, taking into account long-term exposure to low dose rate. The proposed methods make it possible to reduce IC’s samples required to be irradiated at a “low” (0.01 rad (Si)/s) dose rate, which significantly reduces irradiation time. The essence of the methods is to consistently reduce dose rate from ~10–100 rad(Si)/s to 0.01 rad (Si)/s and to analyze failure doses obtained at different dose rates.

***References***

1. The effect of cosmic radiation on integrated circuits / Chumakov A. I. // Moscow: Radio i svyaz, 204–320 p.
2. OST 134-1034-2012. Apparatura, pribory, ustrojstva i oborudovanie kosmicheskih apparatov. Metody ispytanij i ocenki stojkosti bortovoj radioelektronnoj apparatury kosmicheskih apparatov k vozdejstviyu elektronnogo i protonnogo izluchenij kosmicheskogo prostranstva po dozovym effektam.
3. РД В 319.03.37-2000. Izdeliya elektronnoj tekhniki. mikroskhemy integral'nye i poluprovodnikovye pribory. Inzhenernye metody uskorennyh ispytanij na stojkost' k vozdejstviyu nizkointensivnogo protonnogo i elektronnogo izluchenij kosmicheskogo prostranstva.
4. MI-STD-883H — Ionizing radiation (total dose) test procedure // Department of Defense. Test method standard. Microcircuits, 2010. 729 p.
5. Pease R. and Seiler J. Evaluation of MIL-STD-883/Test method 1019.6 for bipolar linear circuits // Subm. to J. of Radiation Effects: Research and Engineering, 2005.

УДК 621.3.049.771.14 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.314.316

# Семейство полноцветных и монохромных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов

## A Family of Color and Monochrome Active-Matrix OLED Microdisplays

**Дарвин Д. О.[1], Забабурин А. Ю.[1], Ильин С. А.[1], Илюшкин Т. Ю.[1], Ласточкин О. В., к. т. н.[1], Нуриев А. В., к. т. н.[2], Стахарный С. А.[2], Титов А. И.[1], Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.[1]**
*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dshipitsin@niime.ru*
*[2] АО «ЦНИИ «Циклон»*
*107497, г. Москва, Щелковское ш., 77*
*s.staharnyj@cyclone-jsc.ru*

**Darvin D. O.[1], Zababurin A. Yu.[1], Ilin S. A.[1], Ilushkin T. Yu.[1], Lastochkin O. V.[1], Ph.D, Nuriev A. V.[2], Ph.D, Staharnyi S. A.[2], Titov A. I.[1], Shipitsin D. S., Ph.D[1]**
*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dshipitsin@niime.ru*
*[2] "CRI "Cyclone" JSC*
*s.staharnyj@cyclone-jsc.ru*

В статье описываются состав и характеристики семейства полноцветных и монохромных активно-матричных дисплеев по технологии КМОП 180 нм, разработанных АО «НИИМЭ» и АО «ЦНИИ «Циклон».
**Ключевые слова:** микродисплей; органические светодиоды; OLED; SiOLED.

The paper presents the composition and characteristics of a family of full-color and monochrome active-matrix displays using CMOS 180 nm technology, developed at "NIIME" JSC and JSC "Central Research Institute "Cyclone".
**Keywords:** microdisplay; organic light-emission diodes; OLED; SiOLED.

На сегодня ключевую роль в восприятии информации человеком играет качество используемых дисплеев [1–3]. В современной микроэлектронике наблюдается постоянное улучшение как прямых характеристик дисплеев: цветности, контрастности, времени отклика, так и косвенных — размеров, веса и энергопотребления. Одной из наиболее перспективных является технология микродисплеев на основе органических светодиодов с кремниевой активноматричной схемой управления (SiOLED microdisplays).

В ходе проведенных работ создано семейство полноцветных и монохромных активноматричных микродисплеев на основе органических светодиодов для систем гражданского, аэрокосмического и специального применения, ориентированных на визуализацию информации в режиме, приближенном к реальному времени, на базе субмикронной полупроводниковой технологии КМОП 180 нм [1]. Проектирование выполнялось с учетом проведенных исследований характеристик исходных OLED-структур, в том числе в диапазоне температур.

Унифицированный подход, примененный при разработке, обеспечивает гибкость при масштабировании на широкий спектр номенклатуры разрешений матрицы вплоть до дисплеев high definition (HD).

В состав основных компонентов базовой разработки входит базовая полноцветная матрица с параметрами:

- разрешение, пиксель — 1292×1036;
- видеоинтерфейс — цифровой RGB (3×10 бит);
- частота кадров — от 25 до 85 кадров/с;
- контрастность, ед. — 300:1;
- яркость, Кд/м$^2$ — монохромных белых — 800, полноцветных — 150, монохромных зеленых — 3000;
- градаций яркости — 256;
- интерфейс управления параметрами матрицы — I2C;
- напряжение питания матрицы / периферии / ядра — ±5,0 / 3,3 / 1,8 В;
- потребляемая мощность — не более 600 мВт;
- количество уровней металлизации СБИС управления — 7;
- размеры (Д×Ш), мм — 20,6×16,0.

Общий вид структуры матрицы пиксельных ячеек показан на рис. 1.

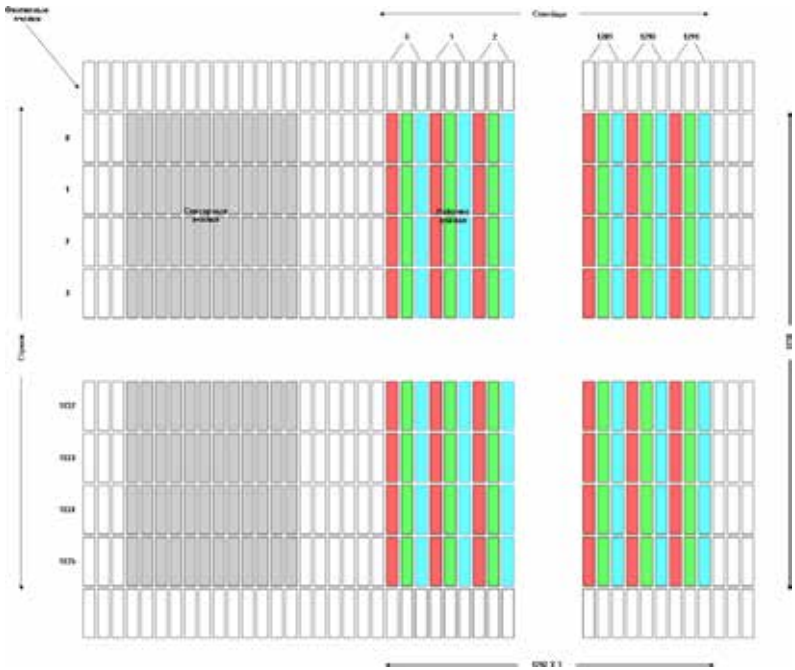


**Рис. 1.** Общий вид фрагмента структуры матрицы пиксельных ячеек

Для реализации задачи создания микросхемы СБИС управления интегрированной светоизлучающей матрицей органических светодиодов была проведена разработка конструкции, топологии СБИС и технологического маршрута, удовлетворяющая следующим требованиям:

- технологический процесс с напряжениями питания 1,8 / 3,3 / 5 В и элементной базой, сходной по параметрам с технологическим процессом зарубежных фабрик, производящих аналогичные СБИС (с минимальными топологическими нормами не более 0,3 мкм и напряжением питания порядка 5,0 В);
- получение специфической топологической структуры в верхних слоях металлизации, предполагающей высокие требования к воспроизводимости рельефа при формировании на пластине. В силу своей специфики структура не является «классической» для микросхем. Требования к топологии структуры были предъявлены на основании анализа снимков РЭМ по микросхемам-аналогам, произведенным за рубежом;
- наличие специальных топологических структур совмещения в заданных местах на пластине в верхнем уровне металлизации;
- специфические требования к подготовке готовых пластин перед поставкой вследствие того, что кристалл микросхемы подвергается последующей обработке на специальном производстве: нанесение органических пленок, формирующих на поверхности пластины OLED-матрицу.

В настоящее время идет процесс освоения серийного производства на отечественном предприятии СБИС управления, интегрированной светоизлучающей матрицей органических светодиодов.

Авторы считают, что разработка СБИС управления для семейства полноцветных и монохромных активноматричных микродисплеев является важным шагом на пути развития отечественной полупроводниковой промышленности и выполнения государственной программы импортозамещения.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
3. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2 частях. — Москва, 2004. — Часть 2.

УДК 621.737.826 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.317.318

# Мощные полупроводниковые лазеры для задач радиофотоники

## Powerful Semiconductor Lasers for Radio Photonics

**Слипченко С. О., к. ф.-м. н., Подоскин А. А., к. ф.-м. н., Веселов Д. А., Пихтин Н. А., к. ф.-м. н., Копьев П. С., член-корр. РАН**
*ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*serghpl@mail.ioffe.ru*

**Slipchenko S. O., Ph.D, Podoskin A. A., Ph.D, Veselov D. A., Pikhtin N. A., Ph.D, Kop'yev P. S., Corresponding Member of RAS**
*Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia*
*serghpl@mail.ioffe.ru*

Рассмотрены основные типы полупроводниковых лазеров, используемых в системах радиофотоники для передачи СВЧ-энергии и информации. Приведены характеристики разработанных мощных многомодовых и одномодовых полупроводниковых лазеров, а также оптоволоконных приемо-передающих модулей на их основе.
**Ключевые слова:** полупроводниковые лазеры; радиофотонный тракт; оптоволоконные модули.

В настоящее время активно ведутся исследования возможностей использования оптического излучения в целях улучшения технических характеристик радиотехнических систем. Область науки, которая занимается подобными исследованиями, получила название «радиофотоника» или «микроволновая фотоника» (Microwave Photonic). В зависимости от решаемых задач радиофотонные системы могут включать широкий спектр элементов (источники, приемники, модуляторы, сумматоры и делители и т. д.), однако базовыми являются источники лазерного излучения и фотоприемники, обеспечивающие прямое и обратное преобразование радиочастотного электромагнитного сигнала в оптическое излучение. Создание современных полупроводниковых лазеров включает ряд технологических этапов, требующих использования как высокотехнологического оборудования, так и высокочистых материалов: разработка и рост лазерной гетероструктуры, формирование одномодовых волноводов, монтаж и согласование с другими элементами схемы (генераторы накачки, оптические волокна, модуляторы). В зависимости от предъявляемых требований к лазерному источнику на каждом этапе создаются условия для достижения желаемых характеристик: длина волны излучения, условия работы (непрерывная накачка или прямая токовая модуляция), рабочая мощность, оптическая апертура принимающего устройства, шумовые характеристики.

В настоящее время в ФТИ им. А. Ф. Иоффе сформирован технологический задел для создания источников лазерного излучения с широким набором выходных характеристик. Разработана базовая технология эпитаксиального роста методом MOCVD полупроводиковых гетероструктур с квантоворазмерными активными областями, обеспечивающими доступные спектры лазерной генерации в диапазоне 800–1600 нм. Разработаны базовые технологии формирования планарных

одномодовых волноводов для решения задач ввода лазерного излучения в различные оптические компоненты: оптические модуляторы, одномодовые и маломодовые оптические волокна и т. д. Разработаны базовые технологии спектральной стабилизации лазерного излучения с использованием внешних и интегральных дифракционных элементов. Это позволило создать одномодовые источники лазерного излучения в спектральном диапазоне 800–1600 нм с выходной мощностью до 500 мВт.

В качестве отдельного направления может быть выделена работа, которая ранее была проведена совместно с АО «Концерн «Вега» при поддержке Фонда перспективных исследований, направленная на создание оптоволоконного модуля для передачи мощных электрических импульсов по оптическому волокну путем конвертации электрических импульсов в лазерные импульсы и обратного преобразования в электрические импульсы с помощью мощных фотоприемных модулей. В разработанном подходе были реализованы условия для генерации и передачи мощных импульсов длительностью 1 нс. С использованием разработанных модулей был создан прототип антенной решетки с реализованной функцией сканирования окружающего пространства. В настоящее время продолжаются исследования, направленные на создание приемо-передающих модулей, обеспечивающих генерацию последовательностей суб-нс импульсов с частотами повторения в ГГц-диапазоне.

***Разработка и исследования одномодовых и многомодовых полупроводниковых лазеров выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-30072).***

УДК 621.373.826 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.319.320

# Одночастотные полупроводниковые лазеры для радиофотонных трактов с внешней модуляцией, излучающие на длине волны 1,55 мкм

## Single-frequency Semiconductor Lasers for Radiophotonic Paths with the External Modulation Emitting at the Wavelength of 1,55 μm

**Багаева О. О., Данилов А. И., Иванов А. В., Курносов В. Д., Курносов К. В., Курнявко Ю. В., Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Романцевич В. И., Рябоштан Ю. Л., Симаков В. А., Светогоров В. Н., Чернов Р. В., Шишков В. В.**
*АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха*
*117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1*
*bereg@niipolyus.ru*

**Bagayeva O. O., Danilov A. I., Ivanov A. V., Kurnosov V. D., Kurnosov K. V., Kurnyavko Yu. V., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A., Romantsevich V. I., Ryaboshtan Yu. L., Simakov V. A., Svetogorov V. N., Chernov R. V., Shishkov V. V.**

Исследованы выходные характеристики мощных одночастотных лазеров с распределенной обратной связью с боковой брэгговской дифракционной решеткой. Приведены рекордные значения энергетических и спектральных характеристик одночастотных РОС-лазеров.
**Ключевые слова:** одночастотные РОС-лазеры; выходные характеристики; длина волны 1,55 мкм; брэгговская решетка.

В последнее время повышенное внимание уделяется мощным лазерам с распределенной обратной связью (РОС-лазерам), излучающим на длине волны 1,55 мкм на одной фундаментальной оптической моде. Одночастотные лазеры занимают лидирующую позицию в современных промышленных разработках. Их широко используют в телекоммуникации, в когерентных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) со спектральным уплотнением каналов для передачи СВЧ-информации на большие (20–100 км) расстояния, волоконно-оптических датчиках, в интерференционных измерениях, в аппаратуре спутниковой связи, в лазерной спектроскопии высокого разрешения, аппаратуре медицинской диагностики, в системах спектроскопии промышленных газов, стандартах частоты, научном приборостроении. Считается, что излучение в диапазоне 1,5–1,6 мкм не опасно для глаза человека [1–3].

Для передачи информации по ВОЛС применяются два типа модуляции оптического излучения:

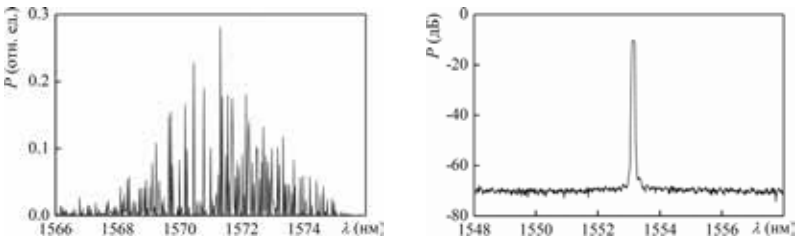
- прямая модуляция оптического излучения лазерного диода электрическим сигналом;
- внешняя модуляция, основанная на использовании интерферометра Маха — Цендера.

Преимущество схемы с внешним модулятором — отсутствие внешних шумов, что особенно важно для одночастотного излучения. При этом необходимой конструктивной особенностью является наличие оптического выхода в виде отрезка

волокна с поддержкой поляризации (типа «Панда»). РОС-лазер — одна из самых важных частей этой системы.

В результате исследования выявлено, что дифференциальная эффективность полученного РОС-лазера составила 0,22–0,3 мВт/мА. Динамические сопротивления РОС-лазера примерно равны одному ому в рабочей точке 500 мА.

На рис. 1*а* представлен спектр генерации в линейном масштабе лазера с резонатором Фабри — Перо при токе накачки 500 мА. Видно, что спектр состоит из многих мод. На рис. 1*б* представлен спектр генерации РОС-лазера в логарифмическом масштабе также при токе 500 мА. Видно, что спектр состоит из одной моды, подавление боковых мод составляет порядка 55 дБ. Сравнивая спектры генерации, представленные на рис. 1*а* и 1*б*, можно увидеть преимущество РОС-лазеров по сравнению с лазерами Фабри — Перо.




*а* *б*

**Рис. 1.** Спектры генерации в линейном масштабе лазера с резонатором Фабри — Перо (*а*) и в логарифмическом масштабе РОС-лазера (*б*) при токе накачки 500 мА

Достигнуты рекордные значения энергетических и спектральных характеристик одночастотных РОС-лазеров с боковой брэгговской дифракционной решеткой с длиной волны излучения 1,5–1,6 мкм.

Для ЛД с длиной резонатора 1,6 мм и шириной мезаполоска 3 мкм, установленных в корпус диаметром 11 мм, при токе накачки не более 700 мА получено не менее 200 мВт мощности излучения для обычного лазера и 150 мВт для РОС-лазера при подавлении боковых мод не менее 53 дБ.

Применение РОС-лазеров является единственным способом реализации технических требований для систем передачи информации СВЧ-диапазона на расстояние (20–100) км.

***Литература***

1. High-Power CW-DFB LDs for Optical Communications [Text] / Takaki K. [et al] // Furukawa Review, 2003. № 23. P. 1–5.
2. Ultra high power, ultra low RIN up to 20 GHz 1,55 μm DFB AlGaInAsP laser for analog applications [Text] / Burie J. R. [et al] // Proceedings of SPIE, 2010. V. 7616. P. 76160Y-1–76160Y-10.
3. 1550 nm DFB semiconductor lasers with high power and low noise [Text] / Zhao Y. G. [et al] // Proceedings of SPIE, 2011. V. 7933. P. 79332J-1–79332J-7.

УДК 621.382.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.321.323

# Сравнение уровней стойкости полупроводниковых и органических светодиодов видимого диапазона к эффектам поглощенной дозы и структурным повреждениям

## Comparison of the Resistance Levels of the Visible Range Semiconductor and Organic LEDs to the Effects of Absorbed Dose and Structural Damage

**Можаев Р. К., Печенкин А. А., Уколов Д. С.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*rkmozh@spels.ru, aapech@spels.ru, dsukol@spels.ru*

**Mozhayev R. K., Pechenkin A. A., Ukolov D. S.**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*rkmozh@spels.ru, aapech@spels.ru, dsukol@spels.ru*

В работе приведено сравнение радиационной стойкости полупроводниковых светодиодов видимого диапазона на основе InGaN-, GaN- и AlInGaP-структур и органических светодиодов (OLED) при воздействии ионизирующего стационарного гамма-излучения и после воздействия нейтронов.
**Ключевые слова:** светодиоды; $A^3B^5$; OLED; оптоэлектроника; радиационная стойкость.

В настоящее время существует большое количество типов светодиодов, различающихся между собой как структурой светоизлучающей области и техническими параметрами, так и разнообразием конструкций и способов коллимации света [1]. Полупроводниковые излучатели света, в частности светодиоды, оказались подходящей заменой газоразрядным излучателям или лампочкам [2]. Светодиоды используются во всех областях светотехники как источники света и как устройства отображения.

При использовании светодиодов в средах с повышенным радиационным фоном [3], таких как атомные станции и физические установки для экспериментов высоких энергий, предъявляются определенные требования к радиационной стойкости изделий.

Для исследований были выбраны полупроводниковые светодиоды на основе структур $A^3B^5$:

- InGaN/GaN — синего, зеленого цвета свечения;
- GaN — зеленого и красного цвета свечения;
- InGaN/$Al_2O_3$ — белого цвета свечения;
- AlInGaP/$Al_2O_3$ — желтого цвета свечения;

Структура OLED включает в себя органические материалы, такие как слой проводящего полимера (полианилин PANI: PSS, полиэтилендиокситиофен PEDOT: PSS) и слой эмиссионного (светоизлучающего) полимера (полиогениленвинилен R-PPV, полифлуорен PF) между анодом и катодом диода. Состав соединений излучающих слов обеспечивал красный, зеленый, синий и белый цвета свечения.

Воздействие нейтронов осуществлялось с помощью реактора быстрых нейтронов. В ходе воздействия образцы находились в пассивном режиме (выводы объединены). Из результатов видно, что тип примеси и ее концентрация влияют на стойкость к нейтронному излучению. Так, излучающая структура $AlInGaP/Al_2O_3$ обладает худшей стойкостью из сравниваемых, а лучшая стойкость у $InGaN/Al_2O_3$ [4]. У органических светодиодов не наблюдалось ни снижения интенсивности, ни сдвига спектра.

Воздействие стационарным гамма-излучением проводилось с помощью изотопной установки $Co^{60}$. Ни у одного из типов полупроводниковых светодиодов не наблюдался ни выход параметров за норму, ни функциональный отказ вплоть до уровня 450 крад.

Органические светодиоды также продемонстрировали значительную стойкость к воздействию гамма-излучения при нормальных климатических условиях (НКУ) до аналогичных уровней воздействия. Однако пониженный температурный режим привел к критичным изменениям в спектре органических светодиодов.

**Таблица 1.** Изменение относительной интенсивности оптического излучения светодиодов после радиационного воздействия

| Цвет свечения | Материал | $I/I_0$, % (гамма-излучение, 450 крад) | | $I/I_0$, % (воздействие нейтронами, 2E+13 н/см$^2$) |
|---|---|---|---|---|
| | | НКУ (+25 °C) | Пониженная температура (−60 °C) | |
| Зеленый | GaN | < 5 % | < 2 % | – |
| | InGaN/GaN | < 5 % | – | 40 % |
| | OLED | < 5 % | 10 % | < 2 % |
| Красный | GaN | < 10 % | < 5 % | – |
| | OLED | < 5 % | 50 % | < 2 % |
| Синий | InGaN/GaN | – | – | 15 % |
| | OLED | 30 % | 65 % | < 2 % |
| Белый | InGaN/GaN | < 5 % | < 2 % | – |
| | $InGaN/Al_2O_3$ | – | – | 20 % |
| | OLED | 10 % | 75 % | < 2 % |
| Желтый | $AlInGaP/Al_2O_3$ | – | – | 50 % |

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы: OLED обладают многократно большей стойкостью к воздействию нейтронов, чем традиционные полупроводниковые диоды, что обусловлено нечувствительностью полимерных аморфных слоев к структурным повреждениям. Стойкость обоих

типов светодиодов к гамма-воздействию при НКУ сопоставимо высока, но при пониженной температуре стойкость OLED-светодиодов ниже на порядок, чем у полупроводниковых $A^3B^5$ светодиодов.

***Литература***

1. Schubert E. Fred. Light-Emitting Diodes (3rd Edition). E. Fred Schubert, 2018. P. 496.
2. Becker H. N., Johnston A. H. Proton damage in LEDs with wavelengths above the silicon wavelength cutoff // Nuclear Science IEEE Transactions on, 2004. Vol. 51. № 6. P. 3558–3563.
3. Gradoboev A. V., Orlova K. N., Asanov I. A. Resistance of LEDs Based on AlGaInP Heterostructures to Irradiation by Fast Neutrons [Text] // J. Chem. Chem. Eng, 2013. № 7. P. 409–413.
4. Ukolov D. S., Chirkov N. A., Mozhaev R. K. and Pechenkin A. A. Radiation Hardness Evaluation of LEDs Based on InGaN, GaN and AlInGaP Heterostructures // 2019 IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL). P. 197–200. DOI: 10.1109/MIEL.2019.8889651.

УДК 681.782.473 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.324.327

# Исследование эффекта образования структурных повреждений в КМОП-матрице при низкоинтенсивном облучении протонами различных энергий

## Studying the Structural Damage Formation Effect in the CMOS Matrix with Protons Low-intensity Irradiation of Various Energies

**Лукашин В. П.[1,2], Яненко А. В.[1,2], Пряничников А. А.[3,4,5], Уланова А. В.[1,2], Никифоров А. Ю.[1,2]**

*[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*[2] АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*vpluk@spels.ru, aapech@spels.ru*
*[3] МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины*
*г. Москва, Россия*
*[4] Физико-технический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН*
*Протвино, Россия*
*[5] ЗАО «Протом»*
*Протвино, Россия*

**Lukashin V. P.[1,2], Yanenko A. V.[1,2], Pryanichnikov A. A.[3,4,5], Ulanova A. V.[1,2], Nikiforov A. Yu.[1,2]**

В работе представлен обзор экспериментальных данных, отражающих суть эффекта формирования структурных повреждений в КМОП-матрице при воздействии протонов низкой интенсивности (5E + 05 п/см$^2$) с различными энергиями — 50, 100, 150 и 200 МэВ. Облучение образцов проводилось с помощью комплекса протонной терапии «Прометеус».

**Ключевые слова:** структурные повреждения; «белые» дефекты; КМОП-матрица; протоны; низкоинтенсивное облучение; оптоэлектронные устройства.

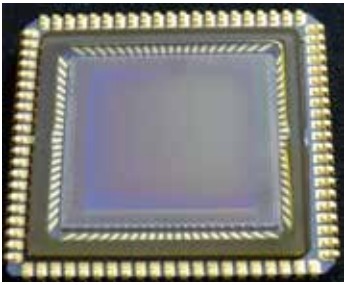


**Рис. 1.** Вид сверху UIC1206

**Рис. 2.** UIC1206 в «оснастке»

***Исследуемый объект***

Объект для эксперимента — КМОП-матрица типа UIC1206 (рис. 1, 2) производства UniqueICs (Зеленоград, Москва). Размер фоточувствительной области — 19×19 мм, формат — 1024×1024 ч/б пикселей, КМОП-технология, 180 нм, фабрика — Silterra Malaysia Sdn. Bhd. (Малайзия).

***Характеристики исследовательской установки***

**Рис. 3.** Внешний вид ускорительного комплекса «Прометеус»

Ускорительный комплекс «Прометеус» [2–4] (рис. 3) предназначен для облучения различных объектов по технологии активного сканирования тонким «карандашным» лучом [5]. Комплекс специально разработан для лечения онкологических больных, а также для проведения физических и биологических исследований. Во время стандартных терапевтических операций интенсивность синхротрона находится в диапазоне от 1E+07 до 2E+09 протонов за цикл. Выбор флюенса за «импульс» для облучения КМОП-матрицы обусловлен интенсивностью протонов в радиационных поясах Земли, где интенсивности протонов могут достигать 5E+05 п/см$^2$ [1]. После модификации ускорителя стал доступен вывод пучка с энергиями ниже 200 МэВ. Достигнута общая минимальная интенсивность 5E+05 протонов за цикл.

***Экспериментальные результаты***

На рис. 4 представлена зависимость сечения приращения количества «белых» дефектов от энергии протонов при флюенсе за «импульс» 5E+05 п/см$^2$.

Анализ результатов исследований показывает, что наиболее критичной с точки зрения эффективности ввода дефектов является энергия 200 МэВ при интенсивности протонов 5E+05 п/см$^2$. В процессе исследований было установлено насыщение «белых» дефектов, проявляющееся в неизменности их количества с увеличением флюенса частиц.

На рис. 5 представлен график зависимости количества «белых» дефектов от суммарного флюенса при облучении двух образцов.

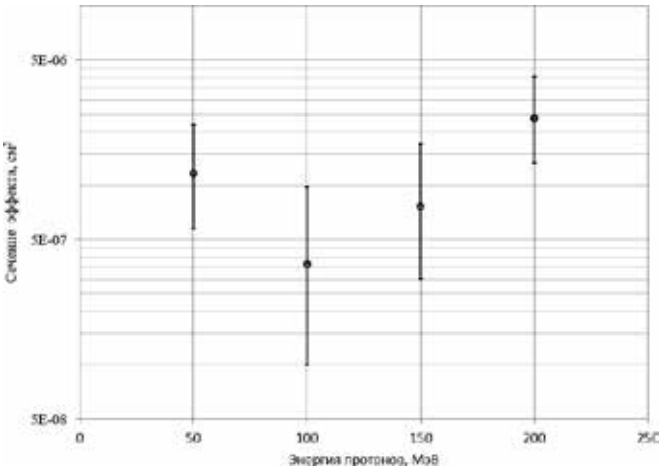



**Рис. 4.** Зависимость сечения приращения количества «белых» дефектов от энергии протонов при флюенсе за «импульс» 5E+05 п/см$^2$

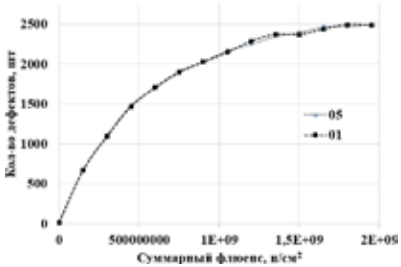



**Рис. 5.** Зависимость количества «белых» дефектов от суммарного флюенса при облучении образцов №№ 05 и 01 с энергией протонов 200 МэВ и флюенсе за «импульс» 5E+05 п/см$^2$

Облучение КМОП-матрицы при интенсивности протонов порядка 2E+09 п/см$^2$ (стандартное значение при использовании ускорителя в терапевтических целях) приводит к тому, что критерий «белого» дефекта (превышение среднего значения темнового сигнала по полю на заданную величину) после первого же сеанса облучения перестает работать из-за значительного роста среднего значения темнового сигнала по полю, в связи с чем контроль количества «белых» дефектов становится невозможным.

***Литература***

1. Poivey Christian, Barth J. L., Label Kenneth, Gee G., Safren H. (2003). In-flight observations of long-term Single-Event Effect (SEE) performance on Orbview-2 solid state recorders (SSR). 102–107. 10.1109/REDW.2003.1281357.

2. Pryanichnikov A. A., Sokunov V. V., Shemyakov A. E. Some Results of the Clinical Use of the Proton Therapy Complex "Prometheus" // Phys. Part. Nuclei Lett. (2018) 15: 981.
3. Balakin V. E. et al. Clinical Application of New Immobilization System in Seated Position for Proton Therapy, KnE Energy & Physics // The 2nd International Symposium "Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine", 2018. P. 45–51.
4. Balakin V. E. et al. Status of the Proton Therapy Complex Prometheus // Proc. RUPAC'18, Protvino, Russia, Oct 2018. P. 135–138.
5. Resch A. F., Palmans H., Georg D., Fuchs H. The practical radius of a pencil beam in proton therapy, Zeitschrift für Medizinische Physik, 2020.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.328.329

# Научно-технические аспекты испытаний твердотельных усилителей мощности с рабочими частотами до 40 ГГц

## Scientific and Technical Aspects of Solid Power Amplifiers Tests with Operating Frequencies up to 40GHz

**Амбуркин К. М., Кузнецов А. Г., Шеремета И. М.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*kmamb@spels.ru*

**Amburkin K. M., Kuznetsov A. G., Sheremeta I. M.**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*kmamb@spels.ru*

Представлены научно-технические аспекты испытаний GaAs pHEMT-усилителей мощности с частотами до 40 ГГц, обобщены показатели чувствительности к импульсному воздействию ионизирующего излучения.
**Ключевые слова:** испытания; СВЧ; твердотельная электроника; усилитель мощности.

Твердотельные СВЧ-усилители мощности (УМ) на основе GaAs pHEMT применяются в качестве промежуточных и оконечных каскадов передающих трактов отказоустойчивой аппаратуры связи и передачи данных, радиолокации, в том числе доверенного назначения. Согласно [1–3] GaAs pHEMT УМ обладают высокой стойкостью к дозовому воздействию ионизирующего излучения (ИИ), структурным повреждениям и низкой чувствительностью к воздействию тяжелых заряженных частиц по эффектам отказов [1]. При импульсном воздействии (ИВ) ИИ характерным является наличие сбоев при относительно низких значениях уровня воздействия (Р), сопровождающихся в ряде случаев значительным временем потери работоспособности. Контроль информативных параметров (выходной мощности, коэффициента усиления, тока потребления) может быть существенно затруднен в силу перегрева кристалла (непрерывный режим работы) или необходимости сопряжения запуска УМ по синхроимпульсу испытательной установки (ИУ) в импульсном режиме.

В настоящей работе представлен подход, направленный на повышение достоверности и информативности результатов испытаний УМ, функционирующих в непрерывном и импульсном режимах, заключающийся в обеспечении синхронизации подачи испытательного воздействия с режимом работы УМ.

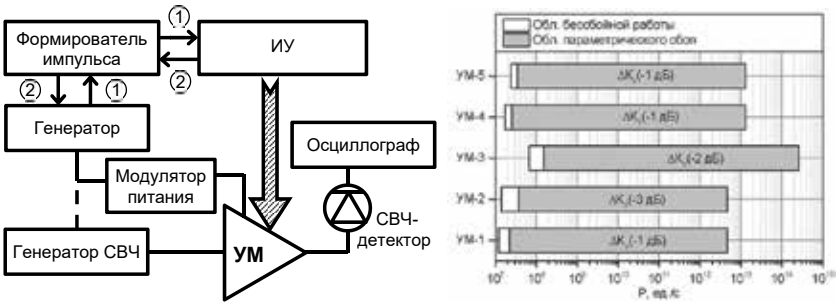
Синхронизация может осуществляться двумя способами:

1) синхронизированная подача сигнала модуляции питания УМ и управления запуском импульса излучения ИУ от внешнего генератора (см. рис. 1*а*,

тракт (1)). Данный подход требует наличия у используемой испытательной установки (ИУ) сигнала внешнего запуска;

2) синхронизация подачи питания на УМ от предварительного синхросигнала ИУ (см. рис. 1*а*, тракт (2)). Данный способ требует использования быстродействующих схем задания режима работы изделия (модуляторы питания и т. п.), т. к. типовые времена опережения предварительного синхросигнала испытательной установки не превышают нескольких микросекунд.

Обобщены показатели стойкости УМ с рабочими частотами до 40 ГГц, изготовленных по технологическим процессам GaAs pHEMT 0,5–0,13 мкм, функционирующих в непрерывном и импульсном (УМ3) режимах.




*а* *б*

**Рис. 1.** Структурная схема стенда для контроля параметров УМ в импульсном режиме при ИВ ИИ (*а*), показатели стойкости GaAs pHEMT УМ (*б*)

***Литература***

1. Назарова Г. Н., Амбуркин К. М., Кузнецов А. Г., Елесин В. В., Полевич С. А., Крутов А. В. Эффекты мощности дозы в современных отечественных СВЧ ИС на основе арсенида галлия // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. сборник, 2015. — Вып. 18. — С. 195–196.
2. Елесин В. В. Расчетно-экспериментальное моделирование эффектов мощности дозы в СВЧ МИС на основе гетероструктурных полевых транзисторов // Микроэлектроника, 2014. — Т. 43. — № 2. — С. 133–141.
3. Жидков Н. М., Кузнецов А. Г., Елесин В. В., Амбуркин К. М., Сотсков Д. И., Усачев Н. А. Показатели радиационной стойкости СВЧ усилителей мощности на основе GaAs pHEMT // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. сборник, 2021. — Вып. 24. — С. 131–132.

УДК 621.3.049.77 + 539.1.043 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.330.331

# Основные особенности испытаний микросхем на импульсную электрическую прочность

## Main Features of Testing Microcircuits for Pulsed Electric Strength

**Аникин А. А., Епифанцев К. А., Скоробогатов П. К.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31, стр. 44*
*aaani@spels.ru, kaepif@spels.ru, pkskor@spels.ru*

**Anikin A. A., Yepifantsev K. A., Skorobogatov P. K.**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*"Specialized Electronic Systems" JSC*
*31/44 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*aaani@spels.ru, kaepif@spels.ru, pkskor@spels.ru*

Рассмотрены методические основы испытаний изделий полупроводниковой электроники на импульсную электрическую прочность. Проанализированы основные требования нормативной документации к проведению испытаний. Описаны методы проведения испытаний и их особенности.

**Ключевые слова:** импульсная электрическая прочность; одиночный импульс напряжения; электромагнитный импульс; электромагнитная наводка; ядерный взрыв; методика испытаний.

В условиях реального применения радиоэлектронная аппаратура (РЭА) может подвергаться воздействию электромагнитных излучений (ЭМИ) различной природы. Одним из наиболее опасных источников ЭМИ является ядерный взрыв (ЯВ). Для определения стойкости электронных компонентов к ЭМИ ЯВ в процессе испытаний на их выводы подаются одиночные импульсы напряжения (ОИН) с параметрами, имитирующими наведенные ЭМИ ЯВ импульсы напряжения, и определяются их показатели импульсной электрической прочности (ИЭП).

В соответствии с [1] под показателями ИЭП изделия понимаются предельные значения параметров ОИН, при которых значения параметров — критериев годности не выходят за установленные нормы. Параметры ОИН — амплитуда и длительность при заданных выходном импедансе и форме сигнала стандартизованного генератора.

В соответствии с [1] выбор выводов, на которые подаются ОИН, осуществляется на основе учета особенностей конструктивно-технологического исполнения испытываемого изделия и реальных условий его применения в РЭА. Рекомендуется разделять выводы на группы и испытывать только один вывод каждой группы. Стоит учесть, какие из выводов имеют бóльшую вероятность наведения на них ОИН. Чем длиннее цепь, которая подключается к данному выводу, тем более вероятно наведение на данной линии ОИН, который приведет к выходу изделия из строя. В некоторых случаях возможно уменьшение количества образцов, необходимых для испытаний, за счет испытаний нескольких цепей на одном и том же образце.

Это возможно только при техническом обосновании независимости этих цепей друг от друга.

В качестве параметров — критериев годности могу быть выбраны все параметры, указанные в ТУ на изделие, но для разных цепей разные критерии — параметры являются более критичными [2]. Поэтому при составлении программы — методики испытаний в них должны быть включены параметры — критерии годности, связанные с выбранными для испытаний цепями.

Испытания на ИЭП проводятся в испытательной оснастке, обеспечивающей проведение испытания изделия в электрическом режиме. Не рекомендуется проводить испытания в пассивном режиме, так как невозможно контролировать возникновение тиристорного эффекта и функциональных сбоев в микросхеме при воздействии ОИН, которые могут возникать в изделии при воздействии ОИН [3]. Также в пассивном режиме невозможно задание режимов работы микросхемы, что в соответствии с работами [4] может оказывать влияние на показатели ИЭП для некоторых типов устройств.

В ходе испытаний рекомендуется контролировать осциллограммы тока и напряжения ИВ ОИН. Контроль осциллограмм ИВ ОИН позволяет зафиксировать возникновение вторичного теплого пробоя p-n-перехода в микросхеме, но не всегда свидетельствует о выходе контролируемых параметров за установленные нормы.

***Литература***

1. ГОСТ 5972-004.10-2012. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Испытания на стойкость к воздействию специальных факторов и импульсную электрическую прочность.
2. Аникин А. А., Епифанцев К. А., Скоробогатов П. К. Типы отказов микросхем запоминающих устройств при воздействии одиночным импульсом напряжения // Тез. докл. 23-й Всеросс. научно-техн. конф. «Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2020», 2020. — С. 88.
3. Шемонаев А. Н., Епифанцев К. А., Скоробогатов П. К., Швецов-Шиловский И. И., Никифоров А. Ю. Тиристорный эффект в КМОП СОЗУ при воздействии одиночным импульсом напряжения // Тез. докл. 24-й Всеросс. научно-техн. конф. «Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2021». — С. 183.
4. Шемонаев А. Н., Епифанцев К. А., Скоробогатов П. К. Experiments on Electrical Overstress Influence on Digital ICs Depending on the Input/Output Port Configuration // 30th International Conference on Microelectronics IEEE Catalog № CFP17432-USB ISBN 978-1-5386-2562-0, 2017. P. 321–323.

УДК 621.182.12 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.332.337

# Особенности проектирования и монтажа систем распределения деионизованной воды в станциях водоподготовки для предприятий электронной отрасли

## Features of Design and Installation of Deionized Water Distribution Systems in Water Treatment Plants for the Electronic Industry

**Сафонова Д. А.**
*АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР»*
*105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 1*
*Safonova@mediana-filter.ru*

**Safonova D. A.**
*"RPC MEDIAN-FILTER" JSC*
*1 Tkatskaya St., Moscow, 105318*
*Safonova@mediana-filter.ru*

Рассмотрены общие моменты проектирования и монтажа систем распределения деионизованной воды в станциях водоподготовки для предприятий электронной отрасли, даны особенности в зависимости от марки деионизованной воды, определены позиции, влияющие на бюджет и сроки оснащения.
**Ключевые слова:** деионизованная вода; петля хранения и распределения деионизованной воды.

The paper considers general aspects of design and installation of deionized water distribution systems in water treatment plants for the electronic industry. Besides, it presents features depending on the brand of deionized water, as well as defines positions affecting the budget and timing of equipment.
**Keywords:** deionized water; deionized water storage and distribution loop.

Важным мероприятием при производстве компонентов в электронной отрасли является получение, хранение и доставка потребителям деионизованной воды требуемого качества.

В зависимости от размера и типа производимой продукции в техпроцессе должна использоваться деионизованная вода соответствующей марки по стандартам Института полупроводниковой техники и материалов (Semiconductor Equipment and Materials Institute — SEMI) Американского сообщества по испытанию материалов (ASTM D5127), а также отечественным ОСТ 11-029.003-80 «Изделия электронной техники. Вода, применяемая в производстве. Марки, технические требования, методы очистки и контроля», ГОСТ Р 58431-2019 «Вода для гальванического производства и схемы промывок», ГОСТ Р 58144-2018 «Вода дистиллированная», СаНПиН 2.1.3684-21, причем в одной станции водоподготовки могут быть использованы несколько стандартов на разных стадиях подготовки воды или для питания различных потребителей [2]. В отличие от медицины и фармацевтики, где основная задача состоит в сохранении микробиологической чистоты, для электроники в первую очередь важно остаточное содержание ионных примесей, газов и частиц. Набор методов очистки для микроэлектроники подразумевает максимальное

снижение солесодержания в объеме станции подготовки и обязательную доочистку и «полировку» в контуре распределения.

В данной статье не рассматриваются методы получения деионизованной воды в целом, считается, что при типовой схеме получения с комбинацией обратного осмоса и электродеионизации в буферный бак-накопитель системы распределения деионизованной воды поступает вода с качеством не менее 10–16 МОм·см, которая затем проходит доочистку и доставляется потребителям в рамках системы распределения.

В целях доочистки и поддержания качества на требуемом уровне система хранения и распределения может включать: засыпные фильтры с ионообменными смолами смешанного действия, обработку ультрафиолетом с длиной волны 254 нм для обеззараживания и 185 нм для разрушения органики и снижения ТОС, удаление бора, удаление газов (кислорода) с применением мембранной дегазации, удаление частиц рейтингом 0,45, 0,2, 0,1, 0,05 мкм, теплообменное оборудование, буферный бак с системой наддува инертного газа (азота) для исключения контакта с атмосферой и возможного вноса загрязнений.

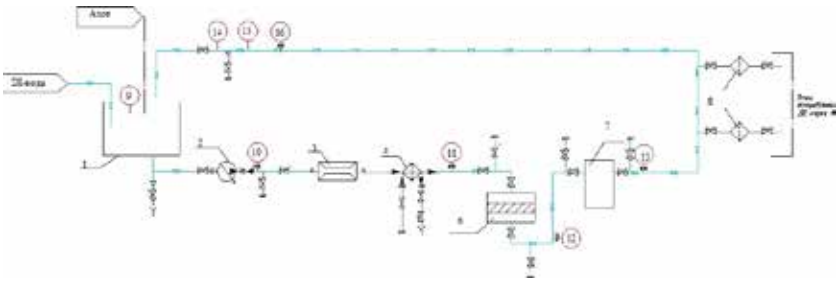


**Рис. 1.** Вариант схемы системы хранения и распределения: 1) емкость деионизованной воды, 2. Насосная станция циркуляции, 3. Ультрафиолетовая установка, 4) теплообменник, 5) ФСД, 6) микрофильтр в петле, 7) микрофильтр в точках отбора, 8) датчик уровня, 9–12) манометры, 13) кондуктометр, 14) расходомер, 15) датчик давления

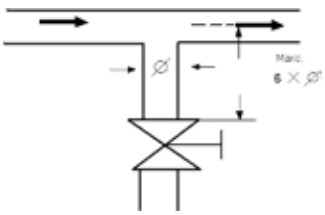


**Рис. 2.** Строение тройника в точке отбора воды

Система распределения имеет значительную поверхность и время контакта с деионизованной водой, поэтому все компоненты должны быть выполнены из инертных материалов и не являться источником дополнительных загрязнений. Трубопроводы системы распределения следует принимать замкнутыми

кольцевыми с постоянной циркуляцией в турбулентном режиме, должно быть обеспечено отсутствие застойных зон для исключения биологической контаминации. При монтаже следует учитывать, что ни одна часть трубопровода не должна находиться в горизонтальном положении для обеспечения полного слива, а точки отбора воды должны быть оборудованы мембранными вентилями санитарного исполнения и спроектированы с учетом правила шестикратного диаметра (рис. 2).

Основными используемыми материалами трубопроводов распределения и арматуры являются полимерные материалы — *PVDF* (*Polyvinylidenefluoride*) — поливинилиденфторид, подобные *PP* (от англ. *Polypropylene* — полипропилен), например гомогенизированный полипропилен PP-H и натуральный полипропилен PP-N производства компании GF Piping Systems и др., причем для воды марок E1 и выше требуется применять полимерный материал типа PVDF. Материалы PP-N и PVDF прозрачные, что позволяет использовать для их монтажа современные аппараты бесшовной сварки, шероховатость места соединения при этом не хуже шероховатости собственно материала (менее 0,8 Ra); материал PP-H непрозрачный и подлежит стыковому термическому монтажу, что обуславливает наличие шва в месте соединения, повышенный микробиологический риск, однако этот риск минимизируется должным проектированием, монтажом и эксплуатацией, что вкупе со стоимостью материала в несколько раз меньше аналогичных позиций из PVDF делает этот материал достойным рассмотрения и использования в проектах.

Проектирование следует начинать с анализа нормативных требований к качеству и расчета потребности в воде на всех стадиях производства, оценку потребностей предоставляют в виде почасового плана-графика. Для оптимизации пиковых расходов рекомендуется:

- избегать одновременной работы крупных потребителей (наполнение ванн, линий отмывки и т. п.);
- предусматривать расход воды равномерно в течение дня, сокращать объем единовременного отбора;
- для потребителей с ручным отбором воды оснащать точки индикаторами расхода по месту;
- при увеличении пиковых расходов воды использовать семафорную систему разбора;
- указывать все индивидуальные требования потребителей: диапазон давления, температуры и т. п.

**Таблица 1.** Почасовой план-график отбора деионизованной воды

| Оборудование | Помещение № | Высота подвода, мм | Пиковый расход, л/с | Температура потребления °C, мин.-макс | Давление бар, мин.-макс | Почасовое потребление, л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 8–9 | 9–10 | 10–11 | ... | 7–8 |
| 1 | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | |

Диаметр контура циркуляции выбирается исходя из требований по обеспечению необходимого расхода и давления во всех точках отбора. Расчет проводится для пикового потреблении воды и проверяется при минимальном и среднем потреблении. Критической точкой является скорость на возврате петли, которая должна соответствовать критерию турбулентности потока. ASTM D5127-13 требует соблюдать скорость потока 0,9–2,1 м/с с оговоркой о частичной применимости указанных скоростей для трубопроводов диаметром более D50 из-за большого соотношения объема к поверхности, по ОСТ скорость циркуляции не регламентирована.

Диаметр контура циркуляции выбирается таким образом, чтобы при пиковом потоке сумма сопротивлений отдельных участков системы (трубопроводы, арматура, фитинги, повороты и подъемы) не превышала определенную величину, как правило, 4–5 бар. Напор насосной станции циркуляции складывается из восполнения потерь давления в системе, требований по давлению в точках отбора и давления для обеспечения эффективной работы системы душирования на возврате петли в накопительную емкость. Циркуляционный поток является суммой пикового отбора в точках и потока, который обеспечивает турбулентную скорость в выбранном диаметре трубопровода на возврате петли. При этом следует учитывать ограничения по допустимому давлению элементов, из которых изготовлена система, и у потребителей воды, при необходимости использовать редукторы давления из инертных материалов.

Прокладка трассы системы распределения может проводиться двумя способами — под потолком с опусками к точкам потребления и/или под фальш-полом либо по техническому этажу с подъемом к точкам. В случае с подъемом петля может быть короче, однако необходимо предусматривать дополнительные краны для слива на основной части контура, что увеличивает общее количество ЗРА петли в отличие от системы с опусками, где для слива используются краны в точках. Трассировка контуров может выполняться также двумя способами — с последовательным обходом всех потребителей или по коллекторно-субпетельной схеме. В первом случае диаметр трубопровода и циркуляционный расход будут выше, такие трассировки применяются для небольшого количества потребителей, расположенных недалеко друг от друга, или в схемах с несколькими отдельными контурами. Коллекторно-субпетельная схема позволяет охватить максимальное количество потребителей, но более сложна в настройке работы, менее гибка к изменениям расходов в точках и трассе, требует тщательного расчета. В обычном случае к точке/группе точек подводится опуск, оканчивающийся краном и штуцером для подсоединения к оборудованию. Для особо ответственных участков (с качеством воды по стандарту ASTM E1.1 и выше) коллекторно-субпетельная схема дополняется циркуляционным контуром от крана на опуске к точке для сохранения максимального качества воды. В точках могут устанавливаться дополнительные микрофильтры, редукторы давления, расходомеры, кондуктометры и др.

Проточные потребители могут оснащаться системой возврата неиспользованной воды, в этом случае на выходе из точки устанавливается прибор контроля качества и трехходовая приводная арматура (слив/возврат), при этом считают, что при отсутствии технологической операции падение качества деионизованной воды происходит вследствие контакта с атмосферой, такая вода может быть возвращена в процесс без дополнительной очистки, точка возврата определяется набором стадий водоподготовки в конкретном проекте.

При выборе оптимального варианта накопительной емкости и производительности установки следует руководствоваться следующими критериями:

- планирование увеличения объема производства, требуемый запас объема деионизованной воды;
- габариты проемов и особенности помещений и маршрута заноса оборудования;
- частота смены воды в емкости;
  - вода из емкости при необходимости должна полностью сливаться. Во избежание застойных зон емкость должна устанавливаться вертикально и высота емкости должна составлять два диаметра;
  - возможность оснащения емкости системой натронной фильтрации воздуха или наддувом инертного газа (азота);
- материал, производитель, стоимость.

Выбор оборудования доочистки зависит от требований к качеству деионизованной воды в конкретной задаче, оборудование доочистки устанавливается в начале контура распределения, и его расчет проводится на циркуляционный расход в контуре. При расчете оборудования учитывают возможность организации возврата части неиспользованной в техпроцессе воды в целях экономии стока.

Источники водоснабжения, оборудование подготовки воды и приготовленная вода подлежат регулярному мониторингу на наличие химических, биологических примесей, частиц и газов в зависимости от ее марки. Мониторинг должен проводиться с помощью инлайн-приборов, передаваться на SCADA-системы, а также периодически подтверждаться лабораторными испытаниями. Для отбора проб предусматриваются специализированные краны-пробоотборники, также могут использоваться мембранные вентили, аналогичные установленным в точках потребления. Минимальный набор контрольно-измерительных приборов петли распределения — кондуктометр на возврате петли, расходомер на возврате петли, датчик температуры, датчик давления, манометр. Дополнительный КИП — кондуктометры на выходе из блока доочистки петли в трубопровод подачи, кондуктометры и расходомеры в точках, анализатор ТОС, анализатор кислорода, кремниймер и т. п.

Автор считает, что в данной работе новой является возможность возврата части неиспользованной деионизованной воды без дополнительной очистки при выполнении указанных условий на станцию водоподготовки, а также подход к выбору материала трубопровода системы распределения из спектра специализированных полимерных материалов в зависимости от марки подготавливаемой деионизованной воды.

Приведенные в статье методики расчета и подбора апробированы на нескольких десятках объектов и подтверждают свою адекватность при настройке и работе. Опыт эксплуатации показывает, что в случае применения бесшовного монтажа для материалов трубопроводов типа натурального полипропилена PP-N и PVDF интервалы санации могут быть увеличены относительно систем с применением трубопроводов из гомогенизированного полипропилена PP-H и стыковым способом термического монтажа. При этом PP-H применялся на объектах с качеством деионизованной воды марок А и Б, опыт эксплуатации подтверждает отсутствие вымывания нежелательных примесей и необходимость санации в среднем один раз в год.

Выводы: наиболее важным является определение пиковых отборов и построение оптимальной конфигурации и трассы петель, т. к. это прямым образом влияет на величину циркуляционного расхода и на бюджет блока оборудования доочистки и системы распределения в целом. Доскональный анализ технологии производства и сравнение с требованиями нормативов определяют перечень оборудования доочистки деионизованной воды в петле распределения: допустим, солевой состав, частицы, TOC и пр. параметры должны соответствовать E1.1 по [2], при этом наличие растворенных газов не принципиально, тем самым, при оснащении можно исключить дорогостоящие стадии очистки, такие как мембранная дегазация. Выбор трубопроводного материала петли распределения определяет стоимость контура и работ по его монтажу, длительность монтажа.

***Литература***

1. Федотов А. Е. Чистые помещения. — М.: АСИНКОМ, 2015. — 512 с., ил.
2. Дроздова А. В., Царьков С. Е., Васильев В. И., Сафонова Д. А., Ломая Т. Л. Системы водоподготовки воды и пара // Технология чистоты, 2016. — №2. — С. 19–25.

УДК 004.056.5 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.338.339

# Подход к повышению уровня доверия к аппаратно-программным платформам информационных систем критически важных инфраструктур в целях предупреждения компьютерных атак с использованием уязвимостей в ПО BIOS

## Approach to Raising the Confidence Level to Hardware and Software Platforms of the Critical Infrastructures Information Systems in Order to Prevent Computer Attacks Using Vulnerabilities in BIOS Software

**Боровиков А. Ю., Маслов О. А., Кузнецов С. Е., Козлов И. А.**
*АО «НТЦ «Атлас» Пензенский филиал*
*440028, г. Пенза, Проспект Победы, 69*
*atlas@atlas-pf.ru*

**Borovikov A. Yu., Maslov O. A., Kuznetsov S. Ye., Kozlov I. A.**

Разработан подход по повышению уровня доверия к аппаратно-программным платформам, предназначенным для применения в информационных системах, телекоммуникационных сетях и автоматизированных системах управления технологическими процессами, обрабатывающих критически важную информацию, для которых реализованы механизмы защиты от компьютерных атак с использованием уязвимостей в ПО BIOS.

**Ключевые слова:** информационные системы; критически важные инфраструктуры; импортозамещение; доверие; доверенные аппаратно-программные платформы; программное обеспечение BIOS.

При создании специализированных изделий, применяемых в составе информационных систем критически важных инфраструктур, помимо реализации целевых функций, перед разработчиком стоит задача выполнения требований по обеспечению отсутствия недокументированных функциональных возможностей и уязвимостей программного обеспечения, способных нарушить штатный алгоритм работы изделий и заданные характеристики безопасности, такие как доступность, целостность, конфиденциальность. К рассматриваемым специализированным изделиям могут быть отнесены устройства управления техническими средствами, средства защиты информации от несанкционированного доступа и прочие вычислительные устройства, к которым предъявляются требования по обеспечению высокой надежности и доступности информации.

Также специализированные изделия должны обеспечивать определенные гарантии по противодействию компьютерным атакам. При этом компьютерные атаки можно условно разделить на два класса: атаки, ориентированные на уязвимости в ПО (ОС, СУБД, прикладное ПО и т. д.), функционирующем на произвольной аппаратной платформе, и атаки, ориентированные на ПО, жестко установленное в аппаратные компоненты (ПО BIOS), используемые при создании аппаратных платформ.

Безусловно, в ходе проведения государственной программы по импортозамещению на российском рынке появились аппаратные компоненты, такие как

процессоры, СБИС, специализированные микроконтроллеры и т.д., отечественной разработки от ведущих производителей АО «МЦСТ», АО НПЦ «ЭЛВИС», АО «Байкал Электроникс». Однако их номенклатура, характеристики и объемы производства на настоящее время не позволяют в полной мере заместить аппаратные компоненты импортного производства, особенно в специализированых изделиях, которые используются в жестких условиях эксплуатации.

Таким образом, доверие к аппаратно-программным платформам иностранного производства в части предотвращения компьютерных атак на ПО BIOS является в настоящее время одним из приоритетов при обеспечении безопасности информации.

Доверенная аппаратно-программная платформа (ДАПП) — это совокупность аппаратно-программных средств и коммуникационных ресурсов, для которых однозначно определены состав, архитектура, алгоритмы функционирования, условия применения, правила обработки информации, проведены исследования на соответствие требованиям по безопасности информации в объеме, согласованном с конкретным регулятором, и получены соответствующие разрешительные документы на программные компоненты, в том числе на микропрограммное обеспечение.

Для ДАПП необходимо выполнение следующих обязательных условий:

- гарантия проектирования и наличие конструкторской документации на аппаратную платформу;
- наличие исходного кода, программной документации и отсутствие опасных функциональных возможностей в ПО BIOS аппаратной платформы;
- применение сертифицированного по требованиям безопасности информации общесистемного, прикладного и специального программного обеспечения по соответствующему уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей;
- применение сертифицированных аппаратно-программных или программных средств защиты информации и средств антивирусной защиты для обеспечения невозможности работы несанкционированных пользователей и замкнутости программной среды;
- поддержка на всем жизненном цикле микропрограммного обеспечения, операционной системы и прикладного программного обеспечения и оперативное устранение обнаруженных в указанном программном обеспечении уязвимостей.

Выполнение указанных условий и реализация организационно-режимных мероприятий позволят создавать средства, отвечающие требованиям нормативно-правовых актов и руководящих документов по защите информации и обеспечивающие необходимый уровень доверия к ним.

***Литература***

1. Лыдин С.С. О средствах доверенной загрузки для аппаратных платформ с UEFI BIOS // Вопросы защиты информации, 2016. — № 3. — С. 45–50.
2. Иванников П.В., Алтухов Н.О. Современные типы атак на BIOS // Молодежный научно-технический вестник, 2015. — № 6. — С. 20.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.340.342

# Интегральные микросхемы. Проблема доверенности

## Integrated Circuits. The Problem of Trust

**Безродный Б. Ф.[1], д. т. н., Беспалов А. В.[2], к. т. н., Смирнов Д. О.[2]**
*[1] АО «НИИАС»*
*109029, Москва, ул. Нижегородская, 27, стр. 1*
*b.bezrodnyi@vniias.ru*
*[2] Наноцентр МИРЭА*
*105118, г. Москва, 5-я улица Соколиной горы, 22*
*nc@mirea.ru*

**Bezrodnyi B. F.[1], Sc.D, Bespalov A. V.[2], Ph.D, Smirnov D. O.[2]**
*[1] "NIIAS" JSC*
*27/1 Nizhny Novgorod St., Moscow, 109029*
*b.bezrodnyi@vniias.ru*
*[2] MIREA Nanocenter*
*22 5th street of Sokolinaya Gora, Moscow, 105118*
*nc@mirea.ru*

Предложен эффективный способ выявления несанкционированных изменений в конструкции интегральных микросхем, сочетающий преимущества разрушающего и неразрушающего методов контроля.
**Ключевые слова:** интегральная микросхема; верификация; разрушающий контроль; неразрушающий контроль.

An effective method for detecting unauthorized changes in the design of integrated circuits has been proposed, combining the advantages of destructive and non-destructive testing methods.
**Keywords:** integrated circuit; verification; destructive testing; non-destructive testing.

Практика разработки интегральных микросхем (ИМС) с последующим их производством на зарубежных фабриках остро ставит вопрос о соответствии полученного продукта требованиям конструкторской документации.

Существуют решения, способные осложнить внесение изменений на этапе производства ИМС:

- минимизация числа логических функций, реализуемых ИМС;
- минимизация геометрических размеров кристалла с целью затруднить размещение дополнительных элементов;
- использование минимально необходимого числа выводов ИМС для сокращения числа потенциальных недекларированных команд;
- использование полного множества комбинаций входных и выходных сигналов. Для цифровых схем это $2^n$ и $2^m$, где $n$ и $m$ — число входных и выходных выводов соответственно;
- split fabrication — решение, заключающееся в разделении производства ИМС на нескольких фабриках. Операции по формированию слоя active и одного-двух слоев металла выполняются на одной фабрике,

а часть — на другой [1]. Затрудняет обратное проектирование оставшейся части дизайна ИМС;

- анализ временных характеристик, при котором на неиспользуемой части кристалла ИМС размещаются элементы, позволяющие контролировать степень заполнения свободного пространства, например цепи триггеров. Анализ времени задержки пути прохождения сигнала позволяет судить о наличии изменений в конструкции ИМС [2].

Ни один из перечисленных методов не дает абсолютной уверенности в отсутствии изменений, внесенных в ИМС при производстве.

Убедиться в безусловном соответствии топологии ИМС конструкторской документации позволяет верификация кристалла на соответствие конструкторской и технологической документации. Для этого требуется получить доступ к внутренней структуре ИМС, изображениями каждого из слоев ИМС и сравнить полученные изображения с файлами GDSII. Совпадение позволит с абсолютной точностью утверждать, что исследованная ИМС соответствует документации разработчика и не содержит дополнительных элементов, внесенных при изготовлении. Недостатком верификации является непригодность верифицированных ИМС для дальнейшего использования.

Для того чтобы распространить результаты верификации на всю партию ИМС, предлагается объединить преимущества электрического тестирования и верификации с использованием разрушающего контроля. Разработчик размещает на кристалле ИМС тестовый элемент, отвечающий, например, за отсутствие избыточного пространства. Изготовленная ИМС тестируется и в случае положительного результата подвергается разрушающему контролю с последующей верификацией. При положительной верификации ИМС считается эталонной, соответствие ей других ИМС подтверждается электрическим тестированием. В дальнейшем верификация ИМС производится периодически, а тестирование возможно на постоянной основе.

***Литература***

1. Trusted Integrated Chips (TIC), отчет о выполнении программы. URL: https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/tic/baa, доступ 12.08.2021 г.
2. Li J. At-speed delay characterization for IC authentication and Trojan horse detection/ Li J., Lach J // Hardware-Oriented Security and Trust, 2008. HOST 2008. IEEE International Workshop on (Anaheim, 9 June 2008). — IEEE, 2008. P. 8–14.

The practice of developing integrated circuits (IC) with their subsequent production at foreign factories sharply raises the question of whether the resulting product meets the requirements of design documentation.

There are solutions that can complicate the introduction of changes at the stage of IC production:

- Minimizing the number of logical functions implemented by IC.
- Minimizing the geometric dimensions of the crystal in order to make it difficult to place additional elements.
- Using the minimum required number of IC outputs to reduce the number of potential undeclared commands.

- Using the full set of combinations of input and output signals. For digital circuits, these are $2^n$ and $2^m$, where $n$ and $m$ are the number of input and output pins, respectively.
- Split fabrication is a solution that consists in dividing the production of ICS in several factories. Operations for the formation of a layer of active and one or two layers of metal are performed at one factory, and some at another [1]. It makes difficult to reverse engineer the remaining part of the IC design.
- Analysis of time characteristics, in which elements are placed on the unused part of the IC crystal, allowing to control the degree of filling the free space. For example, trigger chains. The analysis of the delay time of the signal path allows us to judge the presence of changes in the design of the IC [2].

None of these methods gives absolute confidence in the absence of changes made to the IC during production.

Verification of the crystal for compliance with the design and technological documentation allows you to verify the unconditional compliance of the IC topology with the design documentation. To do this, you need to access the internal structure of the IC, the images of each of the IC layers and compare the resulting images with GDSII files. The coincidence will allow us to state with absolute accuracy that the studied IC corresponds to the developer's documentation and does not contain additional elements introduced during manufacture. The disadvantage of verification is the unsuitability of the verified ICS for further use.

In order to extend the verification results to the entire batch of ICS, it is proposed to combine the advantages of electrical testing and verification, using destructive testing. The developer places a test element on the IC chip, which is responsible, for example, for the absence of excess space. The manufactured IC is tested and, in case of a positive result, is subjected to destructive control with subsequent verification. In case of positive verification, the IC is considered a reference, whose compliance with other ICS is confirmed by electrical testing. In the future, the IC is verified periodically, and testing is possible on an ongoing basis.

***References***

1. Trusted Integrated Chips (TIC), program execution report. URL: https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/tic/baa, access date 12.08.2021.
2. Li J., Lach J. At-speed delay characterization for IC authentication and Trojan horse detection // Hardware-Oriented Security and Trust, 2008. HOST 2008. IEEE International Workshop on (Anaheim, 9 June 2008). IEEE, 2008. P. 8–14.

УДК 548.522 + 539.23 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.343.344

# Гетеропереход GaAs-SnAs-Sn

## GaAs-SnAs-Sn Heterojunction

**Белоусов С.[1], Бобылев М. А.[1], Ковалев В. И.[1], Каевицер Е. В.[1,2], Любченко В. Е.[1]**
*[1] Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН*
*141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1*
*[2] ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*
*119049, г. Москва, Ленинский просп., 4*

**Belousov S.[1], Bobylev M. A.[1], Kovalev V. I.[1], Kayevitser Ye. V.[1,2], Lyubchenko V. Ye.[1]**
*[1] Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences branch in Fryazino*
*1 Vvedensky Square, Fryazino, 141190*
*[2] NUST MISIS*
*4 Leninsky Ave., Moscow, 119049*

Авторами исследовалась возможность создания эпитаксиальных структур GaAs-SnAs на подложках n+-GaAs и i-GaAs, обладающих важным достоинством, имеющим металлический тип проводимости и постоянную решетки, близкую друг к другу. Данные гетероструктуры могут использоваться в качестве базового элемента генераторов и приемников электромагнитного излучения СВЧ- и КВЧ-диапазонов волн.

**Ключевые слова:** гетероструктура; GaAs-SnAs-Sn; диоды Шоттки; эпитаксия.

В настоящее время наблюдается постоянно растущий научный интерес к топологическим полуметаллам Вейля (ТПМ) [1] как к новому классу квантовых материалов. Известно, что соединение SnAs, представляющее интерес для электроники, является таким квантовым материалом, демонстрирующим свойства ТПМ [2]. Однако практическое его применение в приборах сдерживается как недостаточностью изученности физико-химических свойств, так и отсутствием технологических методов работы с этим материалом.

Особый интерес вызывают гетероструктуры GaAs-SnAs, поскольку в качестве наиболее важного достоинства изучаемых структур можно выделить возможность управления свойствами этой системы за счет изменения геометрических размеров и атомно-молекулярной конфигурации объектов. Таким образом, возможно модифицировать энергетический спектр носителей заряда, изменяя физико-химические свойства системы. Гетеропереход GaAs-SnAs может служить некой основой для нового поколения электронных, фотонных, спинтронных и оптоэлектронных приборов из-за сочетания нескольких полезных в технологическом отношении факторов. Во-первых, эти материалы обладают совпадающими размерами параметров кристаллических решеток [3], во-вторых, низкие температуры плавления и практически совпадающие значения зависимости давления насыщенного пара от температуры предполагают идентичность поведения атомов компонентов при образовании растущего слоя при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) гетероперехода. И наконец, олово, как легирующий элемент в методе МЛЭ арсенида

галлия, обладает склонностью к сегрегации растущей поверхностью [4], что должно облегчать формирование сверхтонкой атомной структуры слоя, разделяющего компоненты гетероперехода.

В данной работе реализован послойный синтез стехиометрического арсенида олова с образованием кристаллов кубической сингонии, пространственная группа ***Fm3m***, с параметром ячейки $a$ = 0,5681 нм, аналогичный механизму роста арсенида галлия. С другой стороны, из молекулярных пучков может формироваться и триарсенид тетраолова $Sn_4As_3$, который образует кристаллы тригональной сингонии, пространственная группа ***R 3m***, параметры ячейки $a$ = 1,223 нм, $\alpha$ = 19,22° (по другим данным, пространственная группа ***R 3m***, параметры ячейки в гексагональной упаковке $a$ = 0,4089 нм, $c$ = 3,6059 нм [5]). Технология изготовления структур отличается от представленной ранее [1] тем, что процесс заканчивается осаждением слоя олова толщиной 40–50 нм. Этот слой предохраняет гетеропереход от отравления кислородом при выносе в атмосферу. Резкость перехода и толщины слоев оценивались методами Оже-спектрометрии и спектральной эллипсометрии.

В зависимости от используемой подложки получаемая гетероструктура позволит существенно расширить функциональные возможности приборов, в частности диапазон рабочих частот диодов Шоттки, устойчивость к выгоранию и др.

***Литература***

1. Xu S. Y. et al. Discovery of a Weyl fermion semimetal and topological Fermi arcs // Science. 2015. № 349. P. 613–617.
2. Безотосный П. И., Дмитриева К. А., Гаврилкин С. Ю., Перваков К. С. и др. Исследование электронной зонной структуры сверхпроводника SnAs методом ARPES // Письма в ЖЭТФ, 2017. — Т. 106. — Вып. 8. — С. 493–495.
3. Айтхожин С. А. Подложка для выращивания эпитаксиальных слоев арсенида галлия. Патент РФ 2209260. — публ.27.07.2003.
4. Reddy P. S., Venkatakrishnan K. Enhanced superconductivity in the high pressure phase of SnAs studied from first principles // Physica B: Condensed Matter. V. 505. October 2016. P. 33–40.
5. Kovnir K., Kolen'ko Yu. V., Baranov A. I. et al. Sn4As3 revisited: Solvothermal synthesis and crystal and electronic structure // Journal of Solid State Chemistry, 2009. V. 182. № 3. P. 630–639.

УДК 621.3.049.779 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.345.346

# Разработка и исследование МЭМС-акселерометра

## Research and Development of a MEMS-accelerometer

**Кочурина Е. С.[1,2], к. т. н., Анчутин С. А.[1,2], Мусаткин А. С.[1,2], Дернов И. С.[1,2], Тимошенков А. С.[1,2], д. т. н., Полушкин В. М.[3], к. т. н., Тимошенков С. П.[2], д. т. н.**

*[1] ООО «Лаборатория микроприборов»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*ekochurina@mp-lab.ru, step305@mail.ru, musatkin.a@hotmail.com, i.s.dernov@yandex.ru, at@mp-lab.ru.*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*spt111@mail.ru.*
*[3] ФГБУ «46 ЦНИИ» Министерства обороны Российской Федерации*
*129327, г. Москва, Чукотский пр-д, 10*

**Kochurina E. S.[1,2], Ph.D, Anchutin S. A.[1,2], Musatkin A. S.[1,2], Dernov I. S.[1,2], Timoshenkov A. S.[1,2], Sc.D, Polushkin V. M.[3], Ph.D, Timoshenkov S. P.[2], Sc.D**

*[1] Laboratory of Microdevices Ltd*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*ekochurina@mp-lab.ru, step305@mail.ru, musatkin.a@hotmail.com, i.s.dernov@yandex.ru, at@mp-lab.ru*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*spt111@mail.ru*
*[3] 46 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation*
*10 Chukotsky Lane, Moscow, 129327*

Приведено описание разработанной конструкции чувствительного элемента МЭМС-акселерометра, представлены результаты моделирования. Приведено описание разработанного стенда для проведения исследований. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований.
**Ключевые слова:** чувствительный элемент; МЭМС-акселерометр; автоматизированный стенд; результаты экспериментальных исследований.

This paper describes the developed geometric model of the sensor MEMS-accelerometer, as well as the automated test bench. Besides, it gives the results of experimental studies of MEMS-accelerometers.
**Keywords:** Sensor; MEMS-accelerometer; automated test bench; experimental results.

В работе приведено описание разработанного чувствительного элемента микромеханического акселерометра, который представляет собой конструкцию маятникого типа. Инерционная масса подвешена к основанию при помощи упругих элементов (торсионов), воспринимает действующее ускорение и является одной из обкладок емкостной системы съема сигнала. В качестве неподвижной обкладки используется стеклянная пластина с напыленными электродами.

В работе приведены результаты моделирования конструкции при помощи конечно-элементного анализа. Рабочая частота равна 1148 Гц; первая (рабочая) и вторая частоты различаются в 20 раз, что говорит об оптимально выбранной геометрии ЧЭ и минимальном влиянии других собственных частот [1].

Проведенный статический расчет конструкции показал, что при воздействии ускорения 5 g чувствительный элемент перемещается на 3,6 мкм. В разработанной конструкции методом анодного сращивания был сформирован зазор, равный 8 мкм. Приведены результаты расчета: напряжение материала при воздействии ускорения в 10 раз больше рабочего и составляет $1{,}8 \cdot 10^3$ Па (предел прочности для кремния — $10^9$ Па[2]).

Проведенные расчеты и разработанный технологический маршрут на основе анизотропного травления кремния позволили изготовить МЭМС-акселерометры типа МА-10 и МА-20. Каждый МЭМС-акселерометр типа МА-10 и МА-20 содержит ЧЭ и плату преобразования сформированных емкостей в выходной сигнал датчика.

Проведение исследований изготовленных МЭМС-акселерометров проводилось на разработанном автоматизированной стенде. Разработанное программное обеспечение позволило проводить испытания в автоматическом режиме: задавать необходимую угловую скорость вращения поворотным столом, записывать выходные данные с датчиков, рассчитывать параметры МЭМС-акселерометров. Проведенные испытания показали, что параметры изготовленных датчиков сопоставимы с аналогами.

***Литература***

1. Тимошенков А. С., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Мусаткин А. С., Головинский М. С., Калугин В. В., Пузиков В. В., Тимошенков С. П. Разработка и исследование микромеханического акселерометра // Международный форум «Микроэлектроника-2019». 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — С. 435–437.
2. Ву Э. Прочность и разрушение композитов // Композиционные материалы [Текст]. В 7. Т. 2. Разрушение и усталость / Под ред. Браутмана Л. — М.: Мир, 1978. — С. 206–266.

УДК 621.292.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.347.349

# Установка для измерения коллапса тока GaN-транзисторов в импульсном режиме

## Installation for Measuring the Current Collapse of the GAN Transistors in Pulse Mode

**Аболдуев И. М.[1], Алкеев Н. В.[2], Беляев В. С.[1], Каевицер Е. В.[1,2], Кашлаков И. Д.[1]**
*[1] АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*
*[2] Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН*
*141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1*
*kaevitser_ev@pulsarnpp.ru*

**Abolduyev I. M.[1], Alkeyev N. V.[2], Belyayev V. S.[1], Kayevitser Ye. V.[1,2], Kashlakov I. D.[1]**
*[1] Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*
*[2] Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences branch in Fryazino*
*1 Vvedensky Square, Fryazino, 141190*
*kaevitser_ev@pulsarnpp.ru*

По значениям достоверных ВАХ можно понять исходные данные функционального применения полупроводникового прибора, его работоспособность, качество и воспроизводимость технологического процесса. Измерение ВАХ в непрерывном и импульсном режимах позволяет получить более полную информацию об электрических и тепловых характеристиках исследуемых приборов. Разработана установка для измерения ВАХ в импульсном режиме.
**Ключевые слова:** GaN HEMT; ВАХ; коллапс; импульсный режим; ловушки электронов.

Программное обеспечение разработанного измерительного комплекса (рис. 1) написано в среде разработки Delphi. Для ускорения разработки в качестве программного интерфейса к измерительным приборам (осциллографу и генераторам), подключенным к персональному компьютеру (ПК), было принято решение использовать набор библиотек Keysight (Agilent) IO Libraries Suite фирмы Keysight Technologies, в частности интерфейс прикладного программирования (API) VISA. Программа позволяет задать параметры цикла измерений и вывода результатов. Главное окно программы содержит несколько вкладок. На первой вкладке сосредоточено все управление циклом измерений. Здесь задаются параметры импульсов, подаваемых на затвор и сток транзистора, такие как максимальное и минимальное напряжение вершины импульсов, шаг изменения этого напряжения, значение напряжения полки (основания) импульсов, их длительность и длительность фронтов подаваемых импульсов. Задается коэффициент преобразования (с учетом номинала измерительного сопротивления и коэффициента усиления инструментального усилителя) измеряемого осциллографом напряжения в ток стока. Также на этой вкладке задаются параметры осциллографа и период подачи измерительных импульсов.

На второй вкладке задаются VISA-адреса измерительных приборов. Предусмотрены проверка правильности заданных адресов и доступность подключенных измерительных приборов к ПК. Программа позволяет сохранить конфигурацию измерительного стенда и при новом запуске автоматически считывает ее из сохраненного файла.

На третьей вкладке определяются имя выходного файла результатов измерения, каталог его размещения и формат данных, сохраняемых в нем. В частности, предусмотрено добавление серийного номера прибора, автоматическое добавление даты и времени проведения измерения в имя файла. Это позволяет проводить несколько измерений, не возвращаясь к этой вкладке, и упрощает сортировку и отбор файлов измерений.

На четвертой вкладке размещена краткая инструкция работы с программой.

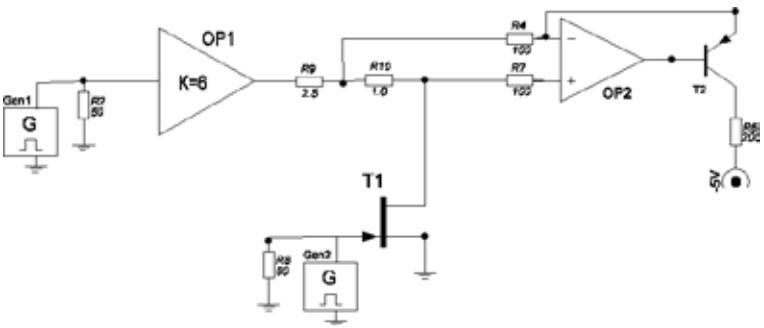



**Рис. 1.** Схема установки для измерения импульсных ВАХ GaN-транзисторов

На рис. 2 показано семейство ВАХ 2-мм транзистора, построенных по результатам импульсных измерений.

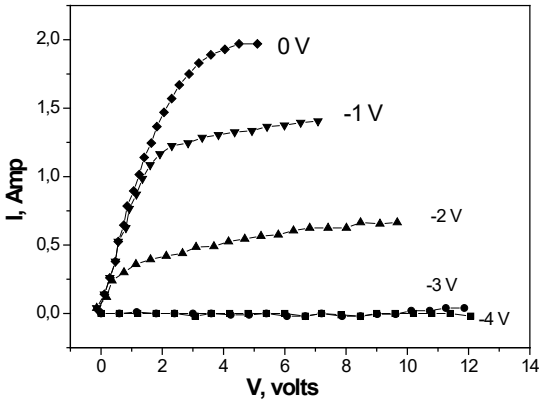



**Рис. 2.** Семейство ВАХ транзистора с шириной затвора 2 мм

Оценку коллапса тока проводили по сдвигу плоской части кривых I-V вниз (когда они выходят на насыщение), используя формулу (1)

$$CC = 100 \cdot (I_{de} - I_{df})/I_{df}, \quad (1)$$

где $I_{de}$ — ток через ловушки, когда на них нет захваченных электронов (empty); $I_{ds}$ — пропускаемый через транзистор ток для заполнения ловушек; $I_{df}$ — величина падения тока при изменении напряжения на затворе.

На рис. 3 приведена зависимость коллапса тока в процентах от напряжения полки; видно, что с ростом этого напряжения коллапс тока увеличивается.

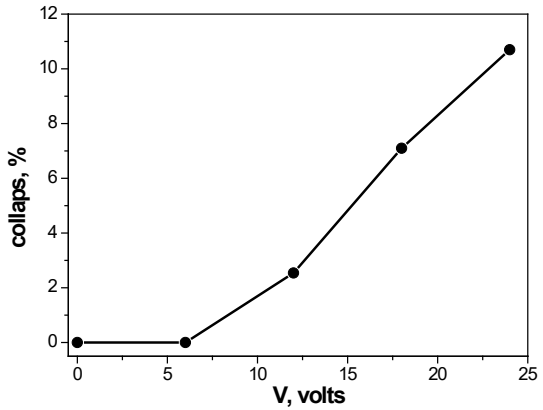



**Рис. 3.** Зависимость коллапса тока от напряжения «полки»

С помощью разработанной установки проведено исследование транзисторов на основе GaN. Подтвержден эффект коллапса, т. е. зависимость вольт-амперных характеристик от различных режимов работы транзистора.

УДК 621.373 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.350.351

# Требования к параметрам полупроводниковых функциональных элементов радиофотонных трактов диапазона СВЧ

## Requirements for the Parameters of Semiconductor Functional Elements of Radio-photonic Links in the Microwave Range

**Белоусов А. А., Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В., Дубровская А. А.**
*Центральное конструкторское бюро автоматики*
*644027, г. Омск*
*ur-vol@yandex.ru*

**Belousov A. A., Volkhin J. N., Gamilovskaya A. V., Dubrovskaya A. A.**
*"Central Design Bureau of Automation" JSC*
*Omsk, 644027, Russia*
*ur-vol@yandex.ru*

Определены структурная схема, конструктивное исполнение и требования к параметрам фотонной и радиофотонной компонентных баз, при которых радиофотонные тракты будут иметь малые потери без использования усилителей в «электрических» трактах и станут более привлекательными для РЭС для вооружений, военной и специальной техники.
**Ключевые слова:** радиофотонный тракт; диапазон СВЧ; электрооптический модуляр; фотодетектор; сверхширокополосный амплитудный детектор.

The paper defines the structural scheme, design and requirements for the parameters of the photon and radio-photon component bases, in which the radio-photon paths will have low losses without the use of amplifiers in the "electrical" paths and will become more attractive for electronic systems for weaponry, military and special equipment.
**Keywords:** radio-photonic link; microwave range; electro-optical modulator; photo detector; ultra-wideband amplitude detector.

В настоящий момент известно о применении радиофотонных устройств в различных радиоэлектронных системах (РЭС) дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, например в системах радиосвязи, радионавигации, радиоэлектронной борьбы и радиоэлектронной разведки, а также в радиолокационных системах. Одним из наиболее востребованных на данный момент типов радиофотонных устройств являются радиофотонный тракт (РФТ). Однако существует целый ряд проблем, из-за которых широкое применение РФТ пока невозможно, например, в РЭС различных авиационных платформ. В данной работе рассмотрены эти проблемы и приведены возможные варианты их решения.

Как правило, РФТ выглядит так, как показано на рис. 1, и содержит оптоволоконный тракт (ОТ), фотодетектор (ФД), источник оптического сигнала (ИОС) и электрооптический модулятор (ЭОМ), обычно в виде модулятора Маха — Цендера (ММЦ).

Определим требования к параметрам элементов РФТ, при которых могут быть получены максимально высокие коэффициенты передачи РФТ ($K_{п.РФТ}$). Коэффициент передачи $K_{п.РФТ}$ возрастает при увеличении уровня мощности сигнала ИОС

($P_{ОП.1}$), уменьшении полуволнового напряжения ММЦ (Uπ), уменьшении потерь в оптическом тракте ММЦ ($K_{З.ММЦ}$) и увеличении фоточувствительности ФД ($П_Ф$). А если говорить про конкретные значения параметров, то при типичных значениях $K_{З.ММЦ}$ (~6 дБ), фоточувствительности $П_Ф$ (~0,6 А/Вт) и потерь в ОТ $K_{З.ОТ}$ (~3 дБ) значения $K_{П.РФТ}$ становятся близкими к нулю при $P_{ОП.1} \geq 200$ мВт и $Uπ \leq 1{,}0$ В.

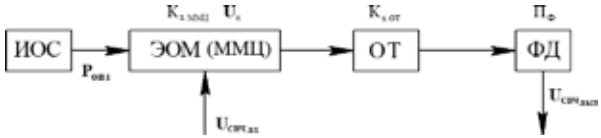



**Рис. 1.** Типичная структурная схема РФТ с внешней модуляцией

При этом при использовании типичных образцов «коммерческой» фотонной и радиофотонной компонентных баз (ФКБ и РФКБ) такие значения $K_{П.РФТ}$ не могут быть достигнуты. К тому же полученные радиофотонные тракты не будут иметь широкого применения в РЭС для вооружений и военной и специальной техники (ВВСТ) из-за больших габаритов и высокой стоимости.

Данные проблемы можно решить при некотором усложнении структурной схемы как это показано на рис. 2 — за счет установки на выходе ММЦ оптического усилителя (ОУ), а также за счет использования только полупроводниковой ФКБ и РФКБ. В этом случае ИОС, ММЦ и ОУ можно будет «объединить» в одной радиофотонной интегральной схеме (РФИС).

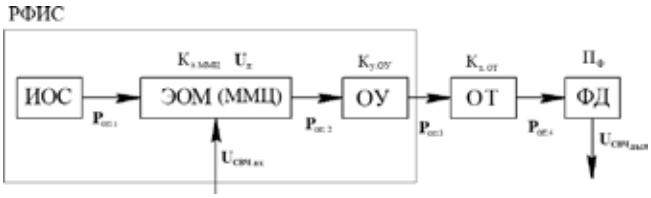



**Рис. 2.** Типичная структурная схема РФТ с ОУ

Таким образом, можно будет реализовать полностью полупроводниковый РФТ с низким уровнем потерь, если параметры ФКБ и РФКБ будут удовлетворять следующим требованиям:

- для ИОС: $P_{ОП.1} \approx 30$ мВт;
- для ММЦ: $Uπ \leq 1$ В; $K_{З.ММЦ} \leq 8$ дБ;
- для ОУ: $K_{У.ОУ} \geq 10$ дБ; уровень мощности оптического сигнала на выходе ОУ ($P_{ОП.3}$) — не менее 50 мВт.

Данные требования приведены для случая $K_{З.ОТ} \approx 3$ дБ и $П_Ф \approx 0{,}6$ А/Вт.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.352.353

# Практический опыт исследований проявления ОРЭ в составе модулей и блоков аппаратуры космического назначения

## Practical Experience in Studies of the ORE Appearing in the Composition of Modules and Blocks Used in Space

**Печенкин А. А., Боруздина А. Б., Новикова М. М., Грицаенко А. Р.**
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*АО «ЭНПО СПЭЛС»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*aapech@spels.ru, abbor@spel.ru, mmnov@spels.ru, armuh@spels.ru*

**Pechenkin A. A., Boruzdina A. B., Novikova M. M., Gritsayenko A. R.**
*National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*2 "Specialized Electronic Systems" JSC*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409*
*aapech@spels.ru, abbor@spel.ru, mmnov@spels.ru, armuh@spels.ru*

Одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) в сложно-функциональных ИМС могут проявляться совершенно различным образом при испытаниях отдельных ИМС и в условиях реального применения. Практический опыт АО «ЭНПО СПЭЛС» совместного использования ускорителей ионов и лазерных источников позволяет проводить исследования проявления ИМС в составе модулей и блоков аппаратуры.
**Ключевые слова:** тяжелые заряженные частицы; бортовая космическая аппаратура; одиночный тиристорный эффект; одиночный сбой; одиночный отказ; электронная компонентная база.

Возникновение ОРЭ в отдельных ИМС может приводить к сбоям в их работе и в ряде случаев к катастрофическому отказу. Как правило, в ходе испытаний оцениваются параметры чувствительности к ОРЭ раздельно по каждому виду эффектов путем облучений отдельных ИМС на ускорителях ионов в наиболее критичных функциональных и электрических режимах.

Очень часто полученные параметры чувствительности приводят к излишне консервативным оценкам частот и вероятностей сбоев и отказов в реальной аппаратуре, т. к. не учитывают алгоритмические и схемотехнические меры по парированию ОРЭ. Как правило, проведение испытаний в составе модулей и блоков на ускорителях ионов невозможно ввиду их значительных массогабаритных характеристик и в ряде случаев невозможности получить низкие плотности потоков частиц (необходимых для корректной работы аппаратуры).

Условия возникновения одиночного тиристорного эффекта (ТЭ) в составе реальной аппаратуры, как правило, более щадящие (ИМС применяются с запасом по напряжению питания, температуре), однако парирование ТЭ специализированными схемами защиты может быть неэффективным из-за взаимодействия с окружающими ЭРИ (за счет подпитки по линиям входов). В то же время сохранение

работоспособности ИМС в состоянии ТЭ может отличаться в составе блока в лучшую сторону по сравнению с испытаниями отдельной ИМС: наличие ограничения тока потребления в цепях питания и облегченные электрический и температурный режим снижают вероятность возникновения катастрофического отказа ИМС при развитии ТЭ.

Одиночные и функциональным сбои сложно-функциональных ИМС в составе аппаратуры при отсутствии должных мер по их парированию могут приводить к отказу блока целиком. Так, например, потеря информации в энергонезависимой памяти, вызванная сбоем контроллера управления, может привести к необратимому (без перезаписи извне) нарушению хода работы бортовой микропрограммы.

Таким образом, исследования реального проявления ОРЭ в составе блоков и модулей аппаратуры космического назначения позволяют разработчикам предпринять адекватные меры по их парированию.

В АО «ЭНПО СПЭЛС» разработан, апробирован и успешно внедрен в практику методический подход совместного использования лазерных испытательных установок со сфокусированным излучением и ускорителей ионов. Лазерные установки позволяют осуществить более гибкий подход к адаптации блоков и модулей аппаратуры, т. к. имеют менее жесткие ограничения на габаритные размеры блоков, позволяют разместить регистрирующую аппаратуру в непосредственной близости от исследуемого блока, сократив длину соединительных линий. В то же время существует неопределенность уровня воздействия лазерного излучения с реальным значением ЛПЭ тяжелых заряженных частиц. Совместное использование лазерных установок с ускорителями ионов позволяет устранить данную неопределенность и установить однозначную корреляцию уровня воздействия лазерного излучения и ЛПЭ.

Типовая последовательность проведения исследований включает следующие шаги:

1) испытание отдельных ИМС с использованием ускорителей ионов и определение сечений ОРЭ при нескольких значениях ЛПЭ;
2) испытание отдельных ИМС с использованием лазерных установок со сфокусированным лазерным излучением и определение зависимости сечения ОРЭ от уровня энергии лазерного излучения;
3) определение коэффициента пропорциональности между энергией лазерного излучения и эквивалентными значениями ЛПЭ;
4) исследования ИМС в составе блока или модуля аппаратуры с использованием лазерных установок с необходимым уровнем воздействия в эквивалентных значения ЛПЭ.

***Литература***

1. Chumakov A. I., Pechenkin A. A., Savchenkov D. V., Yanenko A. V., Kessarinskiy L. N., Nekrasov P. V., Sogoyan A. V., Tararaksin A. S., Vasil'ev A. L., Anashin V. S., Chubunov P. A. Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation, 2013 European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS).
2. Pechenkin A. A., Chumakov A. I. et al. Joint Use of Heavy Ions and Laser Facilities for Single Event Effects Testing // The Second International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research. 2014. Nis. Serbia. P. 443.

УДК 621.3.049.771.14 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.354.355

# Возможности и перспективы контрактной разработки и производства кремниевой микроэлектроники на российской полупроводниковой фабрике

## Opportunities and Prospects for Foundry Production of Silicon Microelectronics at Russian Semiconductor Factory

**Шелепин Н. А., д. т. н., Игнатов П. В., Лукошко Г. К., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dshipitsin@niime.ru*

**Shelepin N. A., Sc.D, Ignatov P. V., Lukoshko G. K., Shipitsin D. S., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dshipitsin@niime.ru*

В статье описываются возможности и перспективы контрактной разработки и производства кремниевой микроэлектроники на российской полупроводниковой фабрике, включая описание внедренных базовых технологических процессов и средств проектирования, а также порядок взаимодействия АО «НИИМЭ» и разработчиков микросхем при выполнении заказов на разработку и изготовление пластин с кристаллами заказанных элементов.
**Ключевые слова:** технологии; библиотеки; микроэлектроника; пластины.

The article describes the opportunities and prospects for foundry production of silicon microelectronics at the Russian semiconductor factory, including a description of the implemented basic technologies and design collaterals, as well as the procedure for interaction between MERI JSC and chip developers when fulfilling orders for the manufacture of silicon wafers.
**Keywords:** technologies; libraries; microelectronics; wafers.

АО «НИИМЭ» проводит научные исследования и опытно-конструкторские работы по федеральным программам Минпромторга РФ, Минобрнауки РФ, ГК «Роскосмос», а также инициативные работы за счет собственных средств. Работы проводятся с различными российскими и зарубежными партнерами в рамках программ по развитию элементной базы [1] и средств проектирования [2, 3], по изготовлению кристаллов интегральных микросхем в режиме foundry для предприятий-партнеров, а также по разработке и освоению серий интегральных микросхем и полупроводниковых приборов.

В части технологий основные задачи:

- модификация технологий уровня 180–90 нм (новые опции);
- разработка технологий уровня 90–65 нм;
- исследование техпроцессов для технологий уровня 45–28 нм;
- энергонезависимая память, в т. ч. на новых эффектах (FRAM, SONOS).

В области средств проектирования ведутся разработка и поддержка в актуальном состоянии:

- базовых комплектов средств проектирования (PDK);

- библиотек стандартных ячеек (Stdcells);
- библиотек ячеек ввода-вывода (IO cells);
- компиляторов статической и постоянной памяти (SRAM, ROM);
- сложно-функциональных блоков (IP-блоков) различного назначения.

В том числе разрабатываются средства проектирования для применения различных методов повышения стойкости СБИС к внешним воздействующим факторам.

АО «НИИМЭ» активно сотрудничает с российскими предприятиями — разработчиками микросхем, участвует в проводимых ими опытно-конструкторских работах в части выполнения заказов на разработку и изготовление пластин с кристаллами заказанных элементов по базовым технологическим процессам с проектными нормами 250, 180 и 90 нм, в том числе по КНИ-технологиям.

При выполнении заказов на разработку и изготовление пластин с кристаллами заказанных элементов АО «НИИМЭ» и разработчики микросхем руководствуются разработанными МНИИРИП нормативными документами: СТО СМКИ.034-2017, в котором регламентируется порядок взаимодействия разработчика микросхем и изготовителя пластин с кристаллами заказанных элементов, и СТО СМКИ.033-2017, в котором изложены требования к пластинам с кристаллами заказанных элементов. Чаще всего заказ размещается в форме выполнения составной части ОКР, но возможны и другие формы (договор на оказание услуг, договор поставки).

Заказ на разработку и изготовление пластин АО «НИИМЭ» выполняет совместно АО «Микрон». При этом АО «НИИМЭ» осуществляет предоставление и техническую поддержку комплектов средств проектирования, прием топологии от заказчика, входной контроль топологии на соответствие конструкторско-технологическим ограничениям (DRM), разработку фотошаблонов и конструкторской документации на пластины, включая ТУ, разработку программы предварительных испытаний пластин, техническое сопровождение изготовления пластин, отгрузку пластин заказчику. АО «Микрон» проводит разработку технологической документации на пластины, закупку фотошаблонов, изготовление пластин, проведение предварительных испытаний пластин, отгрузку пластин в АО «НИИМЭ».

Авторы считают, что АО «НИИМЭ» и в дальнейшем будет играть ведущую роль в развитии отечественной полупроводниковой промышленности и выполнении государственной программы импортозамещения в области микроэлектроники.

***Литература***

1. Красников Г.Я., Шелепин Н.А., Шипицин Д.С., Игнатов П.В. Особенности технологии, компонентов и библиотек уровня 28 нм // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. — С. 45–47.
2. Ильин С.А., Кочанов С.К., Ласточкин О.В. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КНИ 90 нм // Наноиндустрия, 2018. — №S (82). — С. 365–368. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.365.368.
3. Ильин С.А., Ласточкин О.В., Надин А.С. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования радиационно стойких СБИС на базе отечественной технологии КМОП 90 нм на основе RHBD-методологии // Наноиндустрия, 2019. — №S (89). — С. 254–257. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.254.257.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.356.359

# Система автоматизированного проектирования СБИС, решения Synopsys: что нового?

## EDA Flow for ASICs, Synopsys Solutions — What's New?

**Иванова Е. Н.**
***генеральный директор***
*ООО «Синопсис»*
*elena.ivanova@synopsys.com*

**Ivanova E. N.**
***Managing Director***
*Synopsis LLC*
*elena.ivanova@synopsys.com*

Обзор решений компании Synopsys, инструменты имплементации, верификации, IP. Положение компании на рынке.
**Ключевые слова:** САПР; СФ-блоки; разработка микросхем; фотоника; прототипирование; эмуляция.

Overview of Synopsys solutions, implementation tools, verification, IP. Company market position.
**Keywords:** EDA; IP-cores; chip design; photonics; prototyping; emulation.

Компания Synopsys отмечает свое 35-летие в 2021 году. В настоящий момент является лидером на мировом рынке САПР, удерживая первенство более 15 лет. Сохранять лидерство труднее, чем догонять: надо понимать, куда движется технология, заказчики, рынок в целом, надо быть готовым и уже иметь решения для заказчиков, которые только раздумывают о своих следующих шагах.

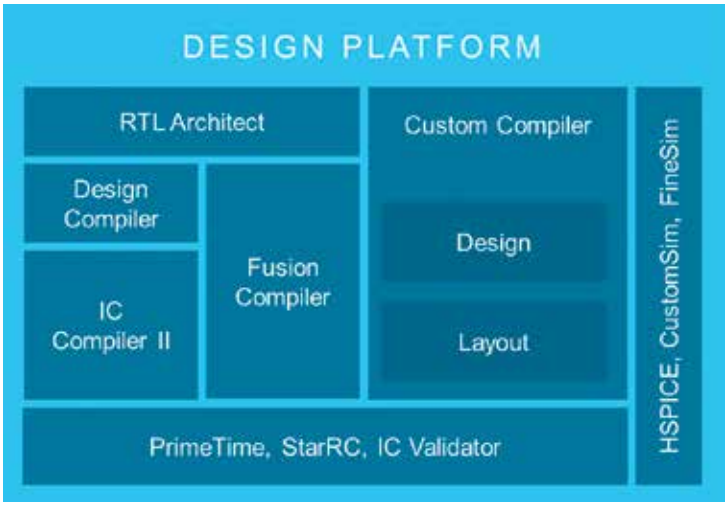
Есть продолжение движения в сторону сокращения размеров транзисторов — 3–5 нм, но данная технология не дает выигрыша в стоимости изделия, если речь не идет о многомиллионных тиражах: были исследования стоимости транзистора по каждой технологии, и начиная с FinFET стоимость остается прежней — значит, должны быть другие цели/потребности для перехода на новый уровень. Это либо занимаемая площадь, что актуально для мини-устройств, по большей части медицинского назначения, либо это снижение энергопотребления — вся мобильная техника. Если же начинать разрабатывать процессор или микросхему более общего назначения, то разработка начинается с определения архитектуры проекта, затем начинается исследование рынка по наличию IP-блоков, это является определяющим фактором и для технологии производства — все физические уровни должны быть в наличии. Если используются внешние устройства, как, например, планки памяти, надо понимать, какой стандарт будет доступен к моменту ТО проекта. И, конечно, дальше уже все зависит от уровня разработчиков, их опыта, а также от поставщика САПР, качества инструментария и технической поддержки.

Что же компания Synopsys предлагает в данный момент?

***Платформа для имплементации***

Fusion Compiler — первый и на данный момент единственный инструмент, который позволяет реализовать работу от RTL до GDSII в единой базе данных, это

не интерфейс, из которого запускаются разные инструменты для логического синтеза и топологии, а единый инструмент, который позволяет ускорить процесс разработки проекта.




RTL Architect — инструмент для анализа архитектуры проекта, в нем заложены те же механизмы, что и в Fusion Compiler, но они делают прогон в разы быстрее, что дает представление о параметрах топологии с очень высокой точностью. Очень эффективен на ранних стадиях разработки, не требует дополнительных настроек — все идентично с Fusion Compiler.

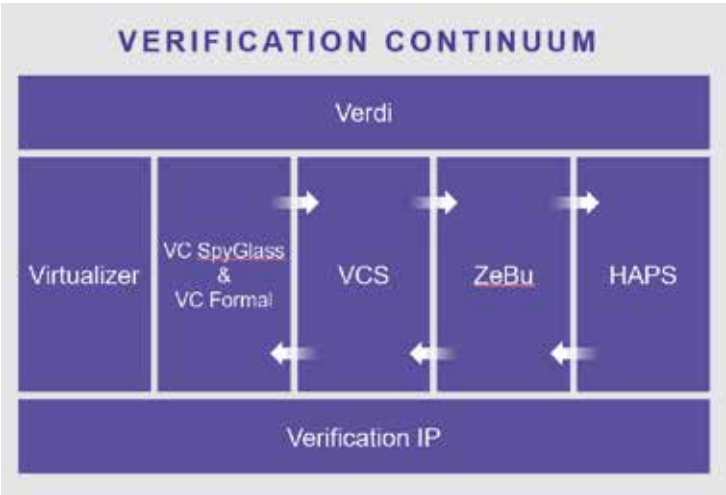
PrimeTime — инструмент нормоконтроля, является золотым стандартом в индустрии. Нативно поддерживает ECO и использование физического дизайна, поддерживает 3 и 5 нм, а также распараллеливание на разные машины для эффективного распределения вычислительных ресурсов.

StarRC — инструмент экстракции паразитных параметров, готов для работы с новыми технологиями 6, 5 и 3 нм и с новым видом транзисторов GAA (Gate All Around).

ICV — инструмент проверки DRC и LVS, активно расширяет долю рынка, одобрен фабриками, имеет ряд интересных преимуществ, таких как распараллеливание расчета на ходу при наличии освобождающихся ресурсов, возможность быстрой проверки на DRC — выявление типа ошибок, исправление на глобальном уровне, функция ICV life, более актуальная для аналогового проектирования: при подключении к Fusion Compiler или Custom Compiler с подключенным runset от фабрики можно видеть DRC по каждому полигону сразу, без дополнительных действий.

Custom Compiler — инструмент аналогового проектирования, очень удобен для пользователя, легкая интеграция с ICV и StarRC; совместно с инструментами моделирования можно производить анализ надежности.

Платформа для верификации:




VCS — инструмент моделирования, ядро платформы, вокруг него строится вся платформа.

Verdi — среда отлаживания и визуализация результатов моделирования.

VC Spyglass — очень востребованный инструмент для отлаживания кода, независим от верификационного окружения, легко интегрируется в маршрут верификации различных вендоров.

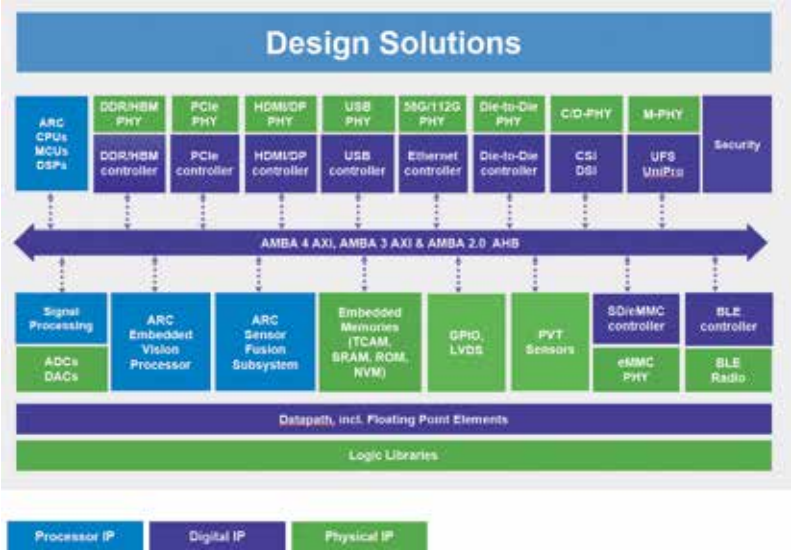
VC Formal — инструмент формальной верификации.

Набор блоков для верификации VIP — очень широкий набор для отладки различных протоколов и проверки интеграции различных интерфейсов в проекте.

Аппаратная часть — прототипирование HAPS; появилась новая модель HAPS-100 производительностью 20–50 МГц, очень эффективная с точки зрения цены на вентиль, построена на последней версии ПЛИС от Xilinx, обладает удобством и простотой использования. Эмуляция ZeBu-4 — современный масштабируемый эмулятор, не требующий специальных условий обслуживания, имеющий до 19 млрд эквивалентных вентилей. При использовании обоих аппаратных решений возможно гибридное моделирование — когда часть проекта остается на компьютере и моделируется на системном уровне с использованием инструмента Virtualizer, а другая часть загружена на аппаратное решение.

***IP-блоки***

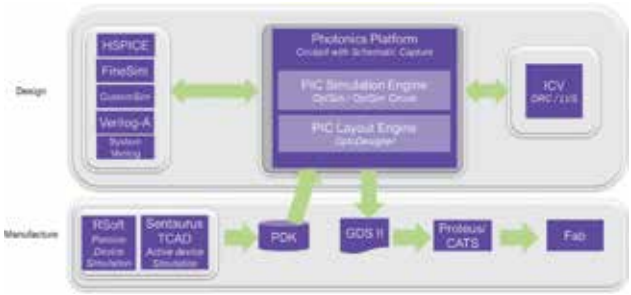
Набор блоков растет, за последний год добавились следующие решения: PVT-мониторы — сенсоры, отслеживающие температуру, напряжение и потребление, позволяющие снимать данные после производственных тестов, также появились решения 400/800G Ethernet. Постоянно идет портирование на новые технологические процессы.




Для блоков есть дополнительная инфраструктура — киты для прототипирования, VIP для проверки интеграции, возможность сборки подсистемы силами Synopsys.

***Другие направления***

Активно развивается инструментарий для фотоники, появилась интеграция фотонных ИС в стандартный маршрут проектирования, платформа называется Photonics Platform и представляет собой полноценное решение.




Компания Synopsys представлена в России двумя представительствами: ООО «Синопсис» — продвижение, обучение, продажи (в рублях), сопровождение решений, и ООО «Синопсис-СПб» — дизайн-центр по разработке ПО для процессора ARC и литографические решения.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.360.362

# Требования к физической верификации СнК в условиях перехода на субнанометровые технологические нормы (менее 16 нм)

## Requirements for Physical Verification of SnK in the Conditions of Transition to Subnanometer Technological Norms (Less than 16 nm)

**Саутер Г.**
***Ведущий технический эксперт***
*«Сименс Электроник Дизайн Аутомейшн»*
*119049, г. Москва, ул. Шаболовка, 10*
*Hermann_Sauter@mentor.com*

**Sauter G.**

Представлен обзор методов физической верификации СнК, актуальность которых вызвана применением субнанометровых технологических норм. Показано как обозначенная проблематика решается средствами автоматизации предпроизводственных проверок применительно к модели fabless и TSMC как производственной площадке.

**Ключевые слова:** физическая верификация; ASIC; DRC; DFM; PERC; TSMC.

Напомним, что уменьшение технологических норм ниже 16 нм обусловлено фундаментальными причинами, которые имеют свой общеупотребимый термин — PPA (Power, Performance, Area). PPA определят ключевые характеристики СнК, их энергопотребление, производительность и размер. Каждая из характеристик определяется типом применения (ИИ, нейросети, краевые вычисления, носимая электроника, 5G и т.д.) и итоговой стоимостью чипа. [1]

Также мировая практика демонстрирует укрепление и консолидацию fabless-модели, в которой TSMC, основная производственная площадка российских заказчиков, показывает устойчивый рост доли рынка. [2]

Фундаментальной поддержкой fabless-модели является опора на САПР-платформу, выполняющую на стороне дизайн-центра предпроизводственные проверки высокой степени надежности и производительности на протяжении многих лет и с регулярными актуальными обновлениями. Важным и связанным компонентом также является интеллектуальная поддержка инженеров, позволяющая не только гарантированно учесть возможности и ограничения производственного процесса фабрики, но и оптимизировать проект так, чтобы повысить выход годных на кремниевой пластине [3].

Переход на новые технологические нормы (менее 16 нм) обозначил целый набор вызовов для дизайн-центров, желающих сохранить темп в части надежности и производительности этапа Sign-off.

Вот те направления, которые мы обозначаем как наиважнейшие и раскрываем в докладе:

- число правил проектирования (DRC) исчисляется десятками тысяч и кратно увеличивается. Для дизайн-центра становится критичной

избирательность проверок в их максимальной применимости к конкретной стадии проектирования с возможностью учета правил на ранних этапах проектирования (методология shift-left [4]). Комплекс задач решается Calibre Recon [5];

- необходимость расчета нескольких фотошаблонов [6]. Решается Calibre Multi-Patterning [7];
- back end и front-end fill стал зависимой характеристикой с финальной топологией СнК (Calibre Yield Enhancer) [8];
- проход отдельных правил более не обеспечивает точности проверок, купирующих цену производственной ошибки. Стал важен контекст и сочетание элементов дизайна. [9] Решается Calibre Pattern Matching [10];
- увеличивающаяся необходимость применения PERC-проверок для анализа утечек [11];
- готовность САПР к пропорциональной масштабируемости производительности при увеличении вычислительных мощностей аппаратного обеспечения как в варианте on-premise, так и Cloud [12].

***Литература***


1. The Increasingly Uneven Race To 3 nm/2 nm. URL: https://semiengineering.com/the-increasingly-uneven-race-to-3 nm-2 nm.
2. Leading semiconductor foundries revenue share worldwide from 2019 to 2021, by quarter. URL: https://www.statista.com/statistics/867223/worldwide-semiconductor-foundries-by-market-share.
3. Calibre Design Solutions. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic/calibre-design.
4. Shift Left Trends for Design Convergence in SOC: An EDA Perspective Vivek Bhardwaj Intel Corporation Penang, Malaysia // International Journal of Computer Applications (0975-8887) Vol. 174. № 16, January 2021.
5. Calibre nmDRC Recon // URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic/calibre-design/physical-verification/early-verification.
6. Multi-Patterning EUV Vs. High-NA EUV. URL: https://semiengineering.com/multi-patterning-euv-vs-high-na-euv.
7. Comparing multipatterning options at 5 nm and below. Jae Uk Lee, Apoorva Oak, Ryoung Han Kim. URL: https://resources.sw.siemens.com/en-US/white-paper-comparing-multi-patterning-at-5 nm-sadp-saqp-and-salele.
8. Keep chip designs on the level with CMP simulation and dummy fill optimization. By Ruben Ghulghazaryan, Davit Piliposyan and Jeff Wilson. URL: https://www.techdesignforums.com/practice/technique/cmp-simulation-and-dummy-fill-optimization.
9. Beyond geometry checks. Context-aware design verification. Sherif Hany and Matthew Hogan Siemens EDA. URL: https://www.eetasia.com/wp-content/uploads/sites/2/downloads/Mentor_WP_EN_202003_02.pdf.
10. Calibre Pattern Matching. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic/calibre-design/physical-verification/pattern-matching.
11. Net common resistance Extraction is crucial to design reliability. Hossam Sarhan Siemens EDA. URL: https://static.sw.cdn.siemens.com/siemens-disw-assets/public/81986/en-US/Siemens-SW-Net-common-resistance-extraction-is-crucial-WP-81986-C2.pdf.

12. Siemens, AMD, and Microsoft collaborate on EDA in the cloud. Omar El-Sewefy Siemens Digital Industries Software. URL: https://www.techonline.com/wp-content/uploads/Siemens_AMDMicrosoftCollaborate_EDACloud.pdf.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.363.364

# Нативная технологическая платформа для физического проектирования субнанометровых СнК технологии 16 нм и ниже

## Native Technological Platform for Physical Design of Sub-nanometer SnK Technology of 16 nm and Below

**Лохов А. Л., к. т. н.**
*АО «МЕГРАТЕК»*
*123007, г. Москва, Хорошевское ш., 38, корп. 1*
*lokhov@megratec.ru*

**Lokhov A. L., Ph.D**

Представлен новый подход к физическому проектированию SoC, ориентированный на параметры трассировки (Detailed Routing Centered), включающий элементы физического ресинтеза для оптимизации кристалла и обеспечивающий получение оптимального результата по критерию PPA (Power Performance Area). Такой подход позволяет практически свести к нулю расхождение по оценке задержек после размещения с реальными задержками, полученными после трассировки. Данный подход реализован в платформе Aprisa (произн. «Апрайза») P&R компании Mentor Graphics.

**Ключевые слова:** физическое проектирование; размещение и трассировка; SoC; PPA; CTS; DRC.

Традиционные методы физического проектирования основаны на последовательности операций — глобальное размещение, предварительная оптимизация, синтез дерева синхросигнала, финальная оптимизация, трассировка, анализ и коррекция по результатам трассировки, внесение DFM-коррекции, финальный GDSII. Послетрассировочные коррекции могут потребовать многочисленных итераций, не обеспечивая при этом оптимальный результат по критерию PPA. Кроме того, традиционный маршрут, как правило, основан на использовании разнородных, хотя формально и объединенных под одной оболочкой, но требующих дополнительных усилий по передаче промежуточных данных.

Новый подход предполагает использование единых моделей данных на всем протяжении маршрута проектирования, что исключает дополнительные затраты на передачу данных в разных форматах [1]. Используется единая система команд для управления процессом проектирования. В качестве примера использования единой среды можно привести оптимизацию временных параметров при размещении путем выбора определенного слоя для соответствующего проводника. На этапе размещения длинная цепь межсоединения проводится через слой металла с благоприятными RC-характеристиками. Эта информация на этапе до трассировки передается всем модулям платформы. Трассировщик соответствующим образом учитывает данное решение, в результате на выходе может быть получен оптимальный результат [2].

Ядро физического проектирования включает следующие модули:

- анализ временных параметров;

- анализ потребляемой мощности;
- анализ падений напряжения и электромиграции в PDN;
- предварительный контроль DRC;
- предварительная экстракция RC;
- физический ресинтез;
- размещение;
- трассировка;
- синтез дерева синхросигнала (CTS).

Система может варьировать критерии, выбирая, например, на этапе CTS критерий оптимизации потребляемой мощности. С учетом того факта, что для технологических норм менее 7 нм определяющее влияние на задержку сигнала оказывает сопротивление цепи, а не емкость, соответствующим образом настраивается экстрактор и модуль оптимизации тайминга.

Другой возможностью описываемого подхода является учет замены одностековых Via на многостековые Via типа Pillar. Такие Via начинают применяться для технологий менее 7 нм. Они обладают специфическими характеристиками и требуют специального анализа при расчете времени задержки. Также поддерживается технология оптимизации задержки при иерархической трассировке, когда связь проходит через несколько блоков.

В целом проведенные бенчмарки подтверждают технологическое лидерство Aprisa P&R по таким параметрам, как реализуемая рабочая частота, снижение потребляемой мощности, снижение токов утечки, минимальный процент необнаруженных DRC и многим другим.

САПР сертифицирован TSMC на все технологические нормы 6–40 нм и более [3].

***Литература***

1. Aprisa Place-and-Route. URL: https://eda.sw.siemens.com/en-US/ic/aprisa.
2. Pre- vs post-route delay correlation for successive process nodes. URL: https://www.techdesignforums.com/blog/2020/09/14/aprisa-team-to-be-doubled-after-mentor-purchase.
3. TSMC certifies Aprisa place-and-route solution from Siemens on TSMC's N6 process. URL: https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/newsroom/tsmc-certifies-aprisa-place-and-route-solution-on-n6-process/96670.

УДК 519.876.5 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.365.367

# Цифровое моделирование. Формирование семантического графа для кодогенерации и автодополнения кода

## Abstract Semantic Graph in HDL Simulation and Code Completion

**Малышев Н. М.**
*Акционерное общество «Eremex»*
*117437, Москва, ул. Профсоюзная, 108*

**Malyshev N. M.**
*Eremex Ltd*
*108 Profsoyznaya St., Moscow, 117437*

В работе представлены вопросы и задачи, решаемые формированием семантического графа при разборе Verilog-кода для создания компилируемой программы на выбранном языке, в частности на C#. Использование графа также упрощает работу пользователя с текстовым редактором при написании кода за счет подсказок и автодополнений.
**Ключевые слова:** FPGA; HDL; Verilog; SystemVerilog; компиляция; ПЛИС; ГАС.

The paper considers the formation of a semantic graph for analyzing Verilog code, which helps to decrease time to create compiled program in selected language like C#. The use of semantic graph also simplifies user's work with text editor in writing HDL program due to suggestions and auto-completions.
**Keywords:** FPGA; HDL; Verilog; SystemVerilog; compilation.

Включение в архитектуру системы цифрового моделирования и верификации графа абстрактной семантики (ГАС) позволяет значительно увеличить скорость работы системы при компиляции проекта, описанного на языках Verilog. Это достигается за счет формирования и последующего анализа ребер графа, сформированного на основе абстрактного семантического дерева (AST, abstract syntax tree), полученного на этапе разбора (парсинга). На рис. 1 представлена укрупненная блок-схема системы моделирования с учетом каждого этапа по разбору исходной программы пользователя. Следует отметить, что компиляция проектов на Verilog происходит значительно быстрее компиляции VHDL-проектов. Это возможно за счет формирования меньшего числа вершин, коими на языке VHDL являются библиотечные структуры и объекты, используемые в пакетах std_logic_1164, numeric_std и др.

Быстрый анализ пользовательского кода на этапе его проектирования и формирование ГАС в фоновом режиме дают возможность выявить и исправить предполагаемые неточности при написании разработчиком программы еще до этапа моделирования. Для этого в систему закладываются инструменты по отображению и предупреждению в графическом интерфейсе (текстовом редакторе) информации из компилятора. Это позволяет ускорить и упростить деятельность разработчика программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) за счет предупреждений и подсказок системы.

**Рис. 1.** Укрупненная блок-схема системы моделирования HDL

На рис. 2 представлена укрупненная схема ориентированного ациклического графа для объекта VerilogCompilerDeclaration, выполняющего компиляцию конструкции объявления module в Verilog, представленного по правилу:

module_declaration :: =
module_nonansi_header [ timeunits_declaration ] { module_item } **endmodule** [ : module_identifier ]
| module_ansi_header [ timeunits_declaration ] { non_port_module_item } **endmodule** [ : module_identifier ]
| { attribute_instance } module_keyword [ lifetime ] module_identifier **( .* ) ;** [ timeunits_declaration ] { module_item } endmodule [ : module_identifier ]
| **extern** module_nonansi_header
| **extern** module_ansi_header

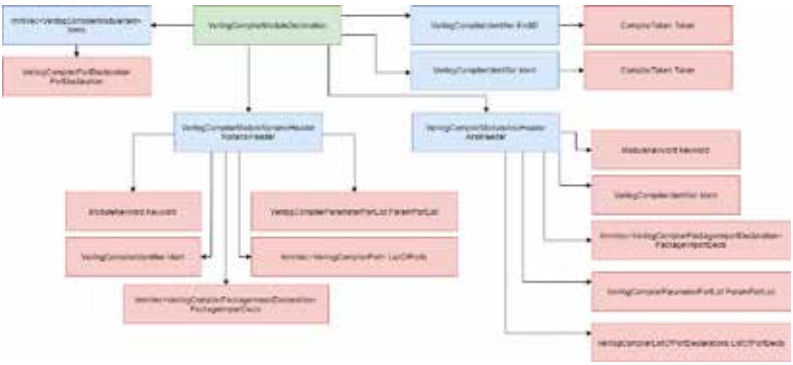


**Рис. 2.** Укрупненная схема ориентированного ацикличного графа для компиляции

***Литература***

1. Малышев Н. М. // Международный форум «Миркоэлектроника». Сборник тезисов. — Крым, 2019.
2. IEEE Standard for SystemVerilog — Unified Hardware Design, Specification and Verification Language, New York, USA. P. 542.
3. IEEE Standard for SystemVerilog — Unified Hardware Design, Specification and Verification Language, New York, USA. P. 391.
4. Бибило П. Н. Синтез логических схем с использованием языка VHDL [Текст] . — М.: Солон-Р, 2009.

EDA systems of developing FPGA provide abstract semantic graph that can increase rapidity of compilation. This can be achieved due to shaping and further analysing graph's edges created on the base of abstract syntax tree (AST). Time for graph formation should be as small as it can. Understanding that main problem we get the main blocks of software (Fig. 1), which can run rapidly and show acceptable results of work.

Figure 2 shows the scheme of directed acyclic graph (DAG) of Verilog module with rules:

module_declaration :: =
module_nonansi_header [ timeunits_declaration ] { module_item } **endmodule** [ : module_identifier ]
| module_ansi_header [ timeunits_declaration ] { non_port_module_item } **endmodule** [ : module_identifier ]
| { attribute_instance } module_keyword [ lifetime ] module_identifier **( .* ) ;** [ timeunits_declaration ] { module_item } endmodule [ : module_identifier ]
| **extern** module_nonansi_header
| **extern** module_ansi_header

***References***

1. Malyshev N. M. Mezdunarodnyi forum Microelectonica, Sbornic tezisov // Krym, 2019 (In Russian).
2. IEEE Standard for SystemVerilog — Unified Hardware Design, Specification and Verification Language, New York, USA. P. 542.
3. IEEE Standard for SystemVerilog — Unified Hardware Design, Specification and Verification Language, New York, USA. P. 391.
4. Bibilo P. N. Syntez logicheskih schem s ispolzovaniem yazyka VHDL // Solon-R.-Moscow, 2009 (In Russian).

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.368.369

# Повышение сбоеустойчивости КМОП СФ-блоков смешанного сигнала

## Increasing Fault Tolerance (Hardness) of Mixed Signal IP-blocks

**Байков В. Д.[1,2], Герасимов Ю. М.[1,2], Петричкович Я. Я.[1], Раннев Н. Ю.[1,2]**
*[1] АО «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд № 4922, 4, стр. 2*
*art@elvees.com*
*[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*
*YMGerasimov@mephi.ru*

**Baykov V. D.[1,2], Ph.D, Gerasimov Y. M.[1,2], Sc.D, Petrichkovich Y. Y.[1], Rannev N. Y.[1,2]**
*[1] R&D Center "ELVEES" JSC*
*bld. 2, 4 Lane 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*art@elvees.com*
*[2] National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*
*YMGerasimov@mephi.ru*

Проанализированы причины сбоев при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) в СФ-блоках смешанного сигнала в составе КМОП СБИС. Установлено, что они связаны в первую очередь с нарушением функционирования синтезаторов частот на основе ФАПЧ (PLL). Даны рекомендации по проектированию сбоеустойчивых быстродействующих СФ-блоков PLL.
**Ключевые слова:** КМОП СБИС; система на кристалле; ФАПЧ; сбоеустойчивость.

The paper analyzes the causes of faults in mixed signal IP-blocks in CMOS VLSI under the influence of single nuclear particles. It has been shown that they relate primarily to the operation failures in frequency synthesizers based on the PLL. Recommendations for the design of radiation-fault-tolerant high-frequency IP-blocks PLL have been proposed.
**Keywords:** CMOS transistor; system-on-chip; SoC; radiation tolerance; radiation-hardening-by-design; IP-block.

Современные СБИС типа «система на кристалле» (СнК), изготавливаемые по нанометровым (суб-100 нм) КМОП-технологиям объемного кремния (ОК), кроме обязательных процессорных ядер и большого числа СФ-блоков памяти, содержат различные периферийные интерфейсные СФ-блоки, работающие с различной частотой передачи данных (блоки смешанного сигнала). Такими блоками, в частности, являются: СФ-блоки генерации и подстройки частоты и фазы тактовых сигналов (PLL и DLL), а также высокоскоростные последовательные интерфейсы SpaceFiber, SpaceWire RUS и др., сбои которых при воздействии ОЯЧ приводят к нарушению синхронизации и работоспособности СБИС СнК.

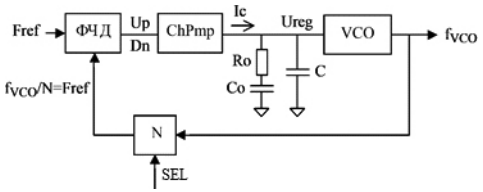



**Рис. 1.** Упрощенная схема СФ-блока PLL: VCO — генератор, управляемый напряжением, ChPmp — зарядно-разрядное устройство, N — программируемый сигналами SEL-делитель выходной частоты, ФЧД — фазочастотный детектор, C — интегрирующая емкость, $C_0R_0$ — демпфирующая цепь

СФ-блоки смешанного сигнала содержат статические (аналоговые), низкочастотные, средне- и высокочастотные функциональные узлы, обладающие различной величиной $LET_0$ и сечением насыщения $\sigma_0$. СФ-блоки PLL в зависимости от архитектуры и конструктивно-топологических особенностей могут обладать как высокой, так и пониженной по сравнению с другими блоками сбоеустойчивостью при воздействии ОЯЧ. Представляется возможным и целесообразным создание СФ-блоков PLL со сбоеустойчивостью не хуже, чем у дерева синхронизации СБИС.

На основе анализа работы СФ-блока PLL600 (рис. 1) по методике, описанной в [1] для КМОП-технологии ОК уровня 90 нм, установлено, что наиболее подвержен сбоям при воздействии ОЯЧ генератор VCO, тогда как сбои ФЧД и попадание частицы на выход блока ChPmp не влияют на работоспособность PLL. Сбои в счетчиках делителей частоты сбивают фазу тактового сигнала обратной связи на входе ФЧД на величину, ограниченную периодом ФЧД (частота PLL изменяется незначительно). Восстановление рабочего состояния PLL600 (захват фазы) требует времени 10–20 мкс, что в большинстве случаев недопустимо.

Разработан сбоеустойчивый СФ-блок PLL600H на основе **оригинального троируемого генератора VCO_H** без использования мажоритарного элемента, а также счетчиков на основе DICE-триггеров и схемы блока ChPmp типа V-CP [2], управляемого напряжением. При этом увеличение площади данного блока на кристалле незначительно по сравнению с исходным.

По результатам моделирования разработанной схемы СФ-блока PLL600H при попадании ОЯЧ в критические узлы блока установлено, что для КМОП-технологии ОК уровня 90 нм сбоев в его работе не наблюдалось до $LET_0$ ~ 15–20 МЭВ·см$^2$/мг.

***Литература***

1. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я., Сергеев Д. К. Особенности проектирования сбоеустойчивых, сверхбыстродействующих логических цепей КМОП СБИС СнК // Наноиндустрия, 2020. — Спецвыпуск (96). Ч. I. — С. 220–228.
2. Loveless T. D., Massengill L. W., Bhuva B. L., Holman W. T., Reed R. A., McMorrow D., Melinger J. S., Jenkins P. A Single-Event-Hardened Phase-Locked Loop Fabricated in 130 nm CMOS // IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 54. №6. Dec. 2007. P. 2012–2020.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.370.372

# Методики TCAD-моделирования параметров микролинз и конструкции элемента выходного ПЗС-регистра с лавинным усилением фоточувствительных ПЗС ИС

## Methods of TCAD-simulation of Microlens Parameters and Design the Output CCD Register Element with an Avalanche Gain of the Photosensitive CCD IC

**Ельников Д. С., Кононов А. А., Коптев Н. С., Пугачёв А. А., к. т. н.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*

**Yel'nikov D. S., Kononov A. A., Koptev N. S., Pugachov A. A., Ph.D**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*

Разработаны методики двумерного TCAD-моделирования двух технических устройств, повышающих чувствительность фотоприемных ПЗС ИС: массива поверхностных микролинз (МЛ) и выходного регистра с лавинным усилением зарядовых пакетов (ВР ЛУ). Приведены варианты TCAD-моделей, с помощью которых были получены параметры МЛ И ВР ЛУ.
**Ключевые слова:** ФПЗС; КМОП-ФД; фоточувствительность; микролинза; лавинное усиление.

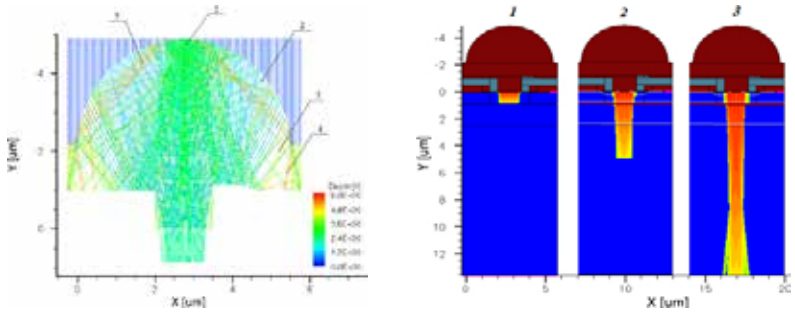
В настоящее время фотоприемные КМОП-фотодиодные ИС (КМОП-ФД) вытеснили фотоприемные ПЗС ИС (ФПЗС) из большинства сфер применения. ФПЗС сегодня могут составить конкуренцию КМОП-ФД, прежде всего при приеме изображений, требующих сверхвысокой фоточувствительности. Повысить чувствительность ФПЗС для достижения порога менее 0,001 люкса позволяют два устройства: микролинзы на элементах фоточувствительной матрицы и уникальный, реализуемый только в ПЗС выходной регистр с лавинным усилением зарядовых пакетов. Микролинзы применяются и в КМОП-ФД-фотоприемниках, в то время как ВР ЛУ доступен только в технологии ПЗС.

Микролинзы (МЛ) формируются над каждой фотоприемной ячейкой (ФЯ) и собирают световой поток со всей поверхности ячейки точно в ее фоточувствительную область. Микролинзы повышают фоточувствительность матриц и улучшает их разрешающую способность, уменьшая перекрестные помехи. Основные параметры микролинзы, влияющие на эффективность сбора светового потока, следующие: радиус микролинзы, высота постамента, апертура.

Разработана методика быстрого TCAD-моделирования ФЯ с микролинзой в среде Sentaurus TCAD (Synopsys). Методика основана на расчете величины объемной фотогенерации (ФГ) в «активных» и «пассивных» областях ФЯ без длительного моделирования процессов генерации, переноса и накопления заряда, как предложено, например, в [1]. Расчет ФГ проводится в специальной «примитивной» ячейке с равномерным профилем примеси, что радикально снижает время моделирования. При этом «реальная ячейка» моделируется только один раз для определения области сбора ФГ заряда.

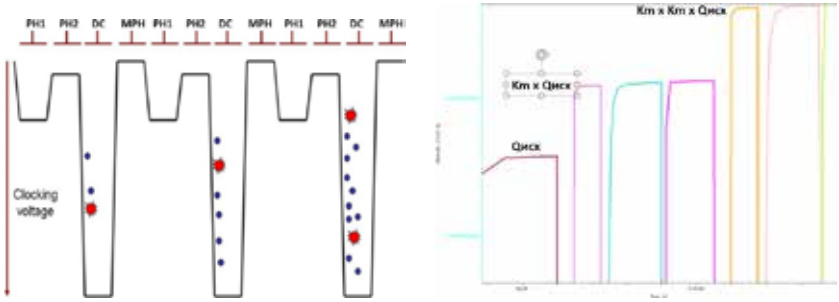
На рис. 1 даны двумерные распределения скорости ФГ для линзы радиусом 2,75 мкм и постаментом толщиной 1 мкм в примитивной ячейке для трех длин волн падающего излучения, которая имеет наилучшее усиление среди всех рассмотренных вариантов. Получены зависимости коэффициента усиления линзы от геометрических параметров микролинзы, которые позволяют повысить фоточувствительность ПЗС-ячеек до 1,75 раз.

Второй способ радикального повышения чувствительности ФПЗС — это увеличение («усиление») числа электронов в зарядовом пакете при его прохождении по выходному сдвиговому регистру. В основе данного усиления лежит управляемая ударная ионизация с малыми — порядка 1,015 — коэффициентами лавинного умножения (Km) в каждой ячейке [2].




*а* *б*

**Рис. 1.** Ход лучей светового потока в микролинзе: 1 — начальные лучи, 2 — одно отражение, 3,4,5 — два, три и четыре отражения соответственно (*а*); распределение скорости ФГ для линзы с максимальным усилением: 1 — длина волны 450 нм, 2 — 555 нм, 3 — 700 нм (*б*)




*а* *б*

**Рис. 2.** Электродная структура ячейки ВР ЛУ (*а*) и диаграмма изменения зарядового пакета (*б*)

Общий коэффициент Km после прохождения всех ячеек регистра лежит в интервале 100–2000. Данный принцип усиления существенно улучшает соотношение сигнал/шум за счет малого собственного шума процесса ударной ионизации. Методика TCAD-моделирования ВР ЛУ позволяет оптимизировать величины управляющих напряжений и определить температурный диапазон работоспособности умножающей ячейки при условиях наилучшей эффективности переноса малых зарядовых пакетов, достижения величины коэффициента единичного умножения Km в интервале 1,015±0,002 и малых величин «темнового» заряда за время одного переноса. На рис. 2 даны схема электродной структуры ячейки с лавинным усилением (*а*) и диаграмма изменения величины зарядового пакета (*б*) при двух стадиях умножения после оптимизации длин электродов и величин управляющих напряжений.

***Заключение***

Разработаны и применены при проектировании методики приборно-технологического моделирования ФПЗС с микролинзами и выходным регистром с лавинным усилением заряда.

***Литература***

1. Herzigy P., Eisnerz M. and Haselbeckz S. Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems // Pure Appl. Opt. 6 (1997). 617–636.
2. Jaroslav Hynecek, Senior Member // IEEE. Impactron—A New Solid State Image Intensifier. IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 48. № 10, October 2001.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.373.375

# Семейство компиляторов радиационно стойких блоков памяти по технологиям КМОП/КНИ с технологическими нормами 180/90 нм

## Compilers of Radiation-hardened Memory Based on 180/90 nm CMOS/SOI Technologies

**Ильин С. А., Ласточкин О. В., к. т. н., Новиков А. А., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*lastochkin@niime.ru*

**Ilin S. A., Lastochkin O. V., Ph.D, Novikov A. A., Shipitsin D. S., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*lastochkin@niime.ru*

В статье описывается семейство компиляторов радиационно стойких блоков памяти, разработанных в АО «НИИМЭ» для действующих и перспективных конструкторско-технологических платформ проектирования по технологиям КМОП (RHBD) и КНИ с нормами 90/180 нм, приведены ключевые характеристики компиляторов.
**Ключевые слова:** конструкторско-технологическая платформа; комплект средств проектирования; радиационно стойкие ИС; радиационно стойкий блок памяти ОЗУ/ПЗУ; однопортовый блок памяти; двухпортовый блок памяти; компилятор памяти.

The article describes a family of compilers of radiation-hardened memory blocks developed at MERI JSC for existing and promising technological design platforms based on CMOS (RHBD) and SOI technologies with 90/180 nm. Besides, it gives key characteristics of the compiler.
**Keywords:** design and technological platform; PDK; DDK; radiation-hardened ICs; radiation-hardened RAM/ROM memory unit; one-port memory unit; two-port memory unit; memory compiler.

В состав практически любой современной СБИС входят блоки ОЗУ/ПЗУ [1]. Они используются для хранения данных, программ управления и т. д. Иногда требуется набор из нескольких блоков разного объема и конфигурации. Решением являются компиляторы памяти — специализированные САПР, позволяющие по заданным требованиям в автоматизированном режиме компилировать блоки памяти в составе необходимых технологических представлений. Использование компиляторов значительно снижает время проектирования и риски некорректного функционирования из-за ошибок в работе памяти и взаимодействия с другими компонентами СБИС. Перед вводом в эксплуатацию блоки памяти проверяются в кремнии с проведением функционального тестирования и испытаний на надежность, а в случае компиляторов радиационно стойкой памяти — с испытаниями к воздействию СВВФ.

Проектирование СБИС по современным полупроводниковым технологиям возможно с применением соответствующих комплектов средств проектирования

(КСП) [2]. Сложность технологий растет, что приводит к усложнению и расширению состава КСП и переходу к понятию платформы [3, 4].

Состав платформы:

- КСП аналоговых и цифроаналоговых СБИС (PDK);
- КСП цифровых СБИС (DDK);
- компиляторы ОЗУ/ПЗУ.

Компиляторы играют важную роль в экосистеме средств проектирования [2], позволяя разработчику использовать блоки, скомпилированные в соответствии с требованиями.

В настоящее время в АО «НИИМЭ» разработаны и поддерживаются платформы для технологий, ориентированных на проектирование СБИС с повышенной стойкостью к СВВФ [3, 4]:

- КНИ 180;
- КНИ 90;
- КМОП 90 (RHBD).

В состав платформ входят компиляторы ПЗУ и одно-, двухпортовых ОЗУ. Характеристики показаны в табл. 1, 2.

Комплект поставки позволяет использовать их в маршруте проектирования в базисе современных САПР и содержит полный набор представлений: CDL/GDS II/LEF/LPE/Liberty/Verilog, документацию.

**Таблица 1.** Основные характеристики компиляторов одно- и двухпортового ОЗУ

| Характеристика | КНИ 180 | | КНИ 90 | | КМОП 90 (RHBD) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | мин. | макс. | мин. | макс. | мин. | макс. |
| количество слов | 8 | 8192 | 8 | 8192 | 16 | 8192 |
| разрядность | 2 | 64 | 2 | 64 | 2 | 64 |
| емкость, бит | 16 | 512K | 16 | 512K | 32 | 512K |
| площадь (1P/2P), мм$^2$ | 0,016 / 0,042 | 8,54 / 13,74 | 0,006 / 0,014 | 7,76 / 10,483 | 0,0045 / 0,0088 | 1,44 / 2,02 |
| время доступа (1P/2P), нс для блока памяти 4096×16 | 7,4 / 8,7 [1)] | | 8,6 / 10,0 [2)] | | 7,28 / 7,98 [2)] | |

**Таблица 2.** Основные характеристики компиляторов ПЗУ

| Характеристика | КНИ 180 | | КНИ 90 | | КМОП 90 (RHBD) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | мин. | макс. | мин. | макс. | мин. | макс. |
| количество слов | 128 | 32768 | 128 | 32768 | 128 | 32768 |
| разрядность | 2 | 32 | 2 | 32 | 2 | 32 |
| емкость, бит | 256 | 1M | 256 | 1M | 256 | 1M |
| площадь, мм$^2$ | 0,0174 | 2,6576 | 0,0072 | 0,7407 | 0,0040 | 0,4592 |
| время доступа, нс для блока памяти 2048×16 | 8,0 [1)] | | 7,7 [2)] | | 2,4 [2)] | |

Условия моделирования:

1) Ucc = 1,62 В, T = 125 °C;
2) Ucc = 1,08 В, T = 125 °C.

Авторы считают, что разработка семейства компиляторов радиационно стойких блоков памяти ОЗУ/ПЗУ по технологиям КНИ 180/90 нм и КМОП 90 нм (RHBD) является важным шагом на пути развития отечественной полупроводниковой промышленности.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано-и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
2. Красников Г. Я., Шелепин Н. А., Шипицин Д. С., Игнатов П. В. Особенности технологии, компонентов и библиотек уровня 28 нм // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019. — С. 45–47.
3. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КНИ 90 нм / Ильин С. А., Кочанов С. К., Ласточкин О. В. и др. // Наноиндустрия, 2018. — № S (82). — С. 365–368. — DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.365.368.
4. Ильин С. А., Ласточкин О. В., Надин А. С. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования радиационно стойких СБИС на базе отечественной технологии КМОП 90 нм на основе RHBD-методологии // Наноиндустрия, 2019. — № S (89). — С. 254–257. — DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.254.257.

УДК 621.382.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.376.378

# Система предварительного расчета рабочих точек транзисторов для оптимизации конфигурации и учета влияния LDE-параметров для технологии КМОП 28 нм

## A System for Preliminary Calculation of the Operating Points of Transistors in Order to Optimize the Configuration and Take into Account the LDE Parameters Influence for 28 nm CMOS Technology

**Надин А. С., Тюрин А. В., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*anadin@niime.ru*

**Nadin A. S., Tyurin A. V., Shipitsin D. S. Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*anadin@niime.ru*

В данной работе предложен метод и разработана система предварительного расчета рабочих точек транзисторов, которая позволяет в реальном времени оценить параметры транзисторов с возможностью учета влияния LDE-параметров на этапе pre-layout-моделирования.
**Ключевые слова:** OP; расчет рабочих точек; обратная аннотация; pre-layout-моделирование; LDE-параметры; PDK; CDF.

In this paper, we propose a method and a system for preliminary calculation of transistor operating points, which allows real-time estimation of transistor parameters, with the possibility of taking into account the influence of LDE parameters at the pre-layout modeling stage.
**Keywords:** OP; calculation of the operating points; back annotation; pre-layout simulation; LDE parameters; PDK; CDF.

Для субмикронных технологий уровня 28 нм [1] и ниже важную роль в проектировании СБИС имеет точность результатов при pre-layout-моделировании, так как это позволяет минимизировать количество повторных итераций перепроектирования с корректировкой электрической схемы и переработкой топологии. Значительное количество повторных итераций связано с недостаточным учетом эффектов близости (LDE — Layout dependent effects) на этапе проектирования электрической схемы, так как ограниченный учет LDE-параметров существенно влияет на базовые характеристики транзисторов [2].

Для оценки и анализа конфигураций транзисторов разработчику необходимо оценить его характеристики и значения основных рабочих точек в различных режимах работы. Параметры Ids, Vth, Vdsat, Gm, Gds, Vtsat и Vtlin (см. табл. 1) являются базовым набором, которые чаще всего востребованы разработчиком ИС для оценки элементной базы при разработке проекта. Такой набор параметров является базовым и может быть скорректирован в соответствии с требованиями разработчика.

**Таблица 1.** Измеряемые рабочие точки транзистора

| Параметры | Описание |
|---|---|
| Ids (A) | Резистивный ток сток-истока |
| Vth (V) | Пороговое напряжение |
| Vdsat (V) | Напряжение насыщения |
| Gm (S) | Крутизна |
| Gds (S) | Выходная проводимость |
| Vtsat (V) | Пороговое напряжение в режиме насыщения |
| Vtlin (V) | Пороговое напряжение в линейном режиме |

Для оценки предлагается метод, где в стандартную CDF-форму описания параметров транзисторов на этапе разработки электрической схемы интегрирован вызов системы предварительной оценки. Практическая реализация метода заключается в разработке и внедрении в PDK специализированной надстройки, которая обеспечивает расчет необходимых параметров в автоматическом режиме. Реализация осуществлена через графический интерфейс (см. рис. 1*а*). Предложенный метод обеспечивает возможность оперативной установки входных воздействий (см. табл. 2) и осуществления в реальном времени расчета рабочих точек транзистора (см. рис. 1*б*) при соответствующих заданных значениях.

**Таблица 2.** Набор входных воздействий

| Параметры | Описание |
|---|---|
| Vg (V) | Напряжение затвора |
| Vd (V) | Напряжение стока |
| Vs (V) | Напряжение истока |
| Vb (V) | Напряжение подложки/кармана |
| Temp (C) | Температура |
| Corner (TT FF SS) | Технологический угол разброса параметров |

*а* *б*

**Рис. 1.** CDF-форма инициализации входных воздействий и форма вывода результатов расчета

В данной работе предложен метод и разработана система предварительного расчета рабочих точек транзисторов, которая позволяет в реальном времени оценить параметры транзисторов с возможностью учета влияния LDE-параметров.

Система имеет следующие ключевые особенности:

- интегрирована в стандартные формы инициализации параметров транзисторов;
- использует системный SPICE-симулятор;
- ускоряет процесс разработки ИС за счет отсутствия необходимости вызова рабочего окружения для SPICE-моделирования и подготовки специализированных тестовых схем (testbench);
- обеспечивается учет всех доступных параметров транзистора, в том числе обратно аннотированных (back annotation).

Данный метод в совокупности с разработанной на его основе системой являются универсальными и могут быть применимы для любых субмикронных технологий и интегрированы в соответствующие комплекты средств проектирования. На текущий момент система внедрена в PDK для технологии 28 нм АО «НИИМЭ», что позволяет разработчикам ИС оптимизировать процесс проектирования ИС.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Шелепин Н. А., Шипицин Д. С., Игнатов П. В. Особенности технологии, компонентов и библиотек уровня 28 нм // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 5 октября 2019 г. — С. 45–47.
2. Надин А. С., Тюрин А. В., Шипицин Д. С. Микроэлектроника-2020. — Ялта, Республика Крым, 28 сентября — 3 октября 2020 г. Спец. выпуск НАНОИНДУСТРИЯ / глав. ред. С. А. Сауров. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — Т. 13. — № S5-2 (102). — С. 403–405.

УДК 621.3.049.771.14 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.379.381

# Исследование и анализ изменения характеристик стандартных цифровых элементов на этапе размещения топологии для технологии КМОП 28 нм

## Research and Analysis of Standard Cells Characteristics at Placement Stage for 28 nm CMOS Technology

**Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., к. т. н., Матвеев А. Л., Новиков А. А., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*annovikov@niime.ru*

**Ilin S. A., Kopeikin D. Yu., Lastochkin O. V., Ph.D, Matveev A. L., Novikov A. A., Shipitsin D. S., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*annovikov@niime.ru*

В работе дана оценка изменению характеристик стандартных цифровых ячеек на этапе размещения топологии вследствие проявления LDE-эффектов и описана специализированная топологическая структура для использования в маршруте проектирования библиотек.
**Ключевые слова:** структурный синтез; библиотеки стандартных цифровых элементов; пороговое напряжение; КМОП; LDE; DDK.

The paper evaluates the change in the characteristics of standard digital cells at the stage of layout placement due to LDE effects, as well as describes a specialized layout structure for using in the library design flow.
**Keywords:** structural synthesis; libraries of standard digital elements; threshold voltage; CMOS; LDE; DDK.

Одной из главных задач при разработке СБИС в базисе технологий уровня 28 нм и ниже является задача обеспечения соответствия результатов моделирования цифровых элементов и элементной базы в САПР и результатов измерений в кремнии [1]. В технологиях подобного уровня характеристики приборов зависят от того, какие структуры и с какими параметрами окружают исследуемый прибор. Подобная ситуация связана с существованием эффектов «топологической близости» (LDE — Layout dependent effects), которые существенно влияют на базовые характеристики транзистора, такие как:

- пороговое напряжение ($V_{TH}$);
- ток насыщения ($I_{DSAT}$);
- ток утечки ($I_{LEAK}$) и др. [2, 3].

В составе топологии СБИС цифровые элементы окружены со всех сторон другими ячейками из библиотеки и могут иметь характеристики, отличающиеся от номинальных, что приводит к изменению характеристик СБИС в целом.

Для оценки влияния LDE-эффектов на результаты паразитной экстракции было создано специализированное ПО на языке SKILL для генерации структур,

представляющих собой целевую ячейку, окруженную с четырех сторон ячейками типа filler с переменным числом «слоев» (см. рис. 1).

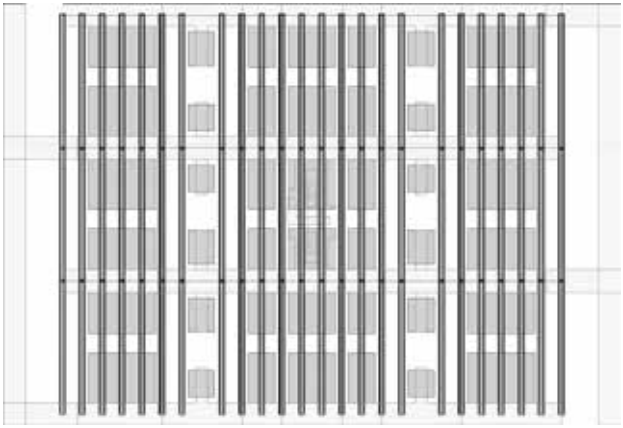


**Рис. 1.** Общий вид тестовой структуры для оценки влияния LDE

Для успешного прохождения DRC/LVS справа и слева к тестовой структуре пристыковываются ячейки TAPCELL (контакт к подложке) и BOUNDARY (замыкание кармана). Для оценки расстояния, на котором LDE-эффекты оказывают заметное воздействие на прибор, были созданы тестовые структуры (рис. 1) с количеством «слоев» от 1 до 10. В результате проведенных исследований установлено, что ключевой вклад в изменения вносит первое «кольцо» паразитных структур.

Для оценки влияния паразитных структур на параметры цифровых элементов была сгенерирована библиотека тестовых структур. Для тестовой и обычной библиотек была выполнена экстракция паразитных параметров и характеризация, получены Liberty-файлы. В базисе полученных Liberty-файлов был проведен синтез блоков из наборов ISCAS'85/89. Полученные результаты для тестовой библиотеки: быстродействие, площадь, потребляемая мощность и мощность утечки — сравнивались с результатами, полученными для базовой версии [4]. Результаты сравнения представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Сравнение результатов синтеза базовой библиотеки и с учетом LDE-эффектов

| Параметр | Среднее отклонение, % |
|---|---|
| Period | −8,13 |
| Area | +0,81 |
| Power | +9,99 |
| Leakage | +54,62 |

Из результата анализа полученных данных следует, что, несмотря на улучшение по быстродействию, окружение ячеек тестовой структурой приводит

к существенному увеличению потребляемой мощности и еще более существенному увеличению мощности утечки.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- разработано специализированное ПО для генерации параметризованных тестовых структур;
- проведен анализ изменения результатов структурного синтеза с учетом LDE-эффектов.

В результате проведенного исследования даны рекомендации по изменению методологии паразитной экстракции для библиотек стандартных элементов. Проведен сравнительный анализ разработанных библиотек по ключевым характеристикам (быстродействие / занимаемая площадь / потребляемая мощность).

***Литература***

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2 частях. — Москва, 2004. Часть 2.
2. Красников Г. Я., Шелепин Н. А., Шипицин Д. С., Игнатов П. В. Особенности технологии, компонентов и библиотек уровня 28 нм // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. — С. 45–47.
3. Надин А. С., Тюрин А. В., Шипицин Д. С. Метод повышения точности схемотехнического моделирования на основе учета LDE-параметров для технологии 28 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 350–352. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.268.271.
4. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Шипицин Д. С. Сравнительный анализ параметров стандартных цифровых элементов на примере библиотек в базисе технологии КМОП 28 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 268–271. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.268.271.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.382.383

# Использование принципов динамических форм при разработке параметризированных ячеек топологии PCELL в среде разработки СБИС для 28 нм

## Using Dynamic Interface Forms for Pcell Development in VLSI CAD for 28 nm Technology

**Тюрин А. В., Трифанихина И. Е., Кириллов М. А., Надин А. С., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*atyurin@niime.ru*

**Tyurin A. V., Trifanikhina I. E., Kirillov M. A., Nadin A. S., Shipitsin D. S., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*atyurin@niime.ru*

В статье представлена технология разработки параметризированной ячейки произвольной настраиваемой конфигурации с помощью динамических интерфейсных форм. Это позволяет провести декомпозицию задачи по разработке большого количества элементов между сотрудниками, не владеющими навыками программирования.
**Ключевые слова:** параметризованная ячейка; SKILL; Cadence.

The acticle presents a technology of pcell development with fully variable geometry using dynamic interface forms. It allows decomposing the task of developing a large number of cells between employees without appropriate programmable skills.
**Keywords:** pcell; SKILL; Cadence.

Обычно под параметризированными ячейками (ПЯ) понимают ячейки с возможностью изменения геометрии [1]. Но в случае когда геометрия коренным образом меняется, разрабатывают новую ПЯ. При необходимости разработки большого количества ячеек затрачиваемое время на разработку обратно пропорционально количеству разработчиков. И если сложные ПЯ (БИКМОП-структуры [2]) разрабатываются отдельно друг от друга, то в случае большого количества более простых структур проблема декомпозиции задачи с привлечением сотрудников, не владеющих навыками программирования, является актуальной. Решение было найдено путем использования динамических форм интерфейса с легко настраиваемой конфигурацией геометрии ячеек.

Входные данные для ПЯ в таких популярных программах, как Pyros (Synopsys), Virtuoso (Cadence) и KLayout, поддерживаются трех типов: строковая переменная, переменная с плавающей точкой, булевая переменная. Однако в Cadence переменные проходят предварительную обработку с помощью специальных триггерных функций (колбеков) в окне интерфейса, в котором можно делать поля с расширенными типами данных. Также язык SKILL поддерживает описание пользовательских интерфейсов. Эти два фактора позволили в Cadence сделать ПЯ с динамической формой интерфейса. Нами была разработана концепция, когда каждый

динамический объект формы (кластер) конфигурирует один полигон. Он имеет максимально удобный для конфигурирования синтаксис. В форме при этом встроен механизм добавления и удаления новых кластеров, что позволяет добавлять и модифицировать в ПЯ любое число полигонов. Все данные из каждого кластера собираются в строковые потоки, которые являются входными параметрами для ПЯ, после чего компилятор формирует геометрию ячейки. Пример использования динамической формы представлен на рис. 1.

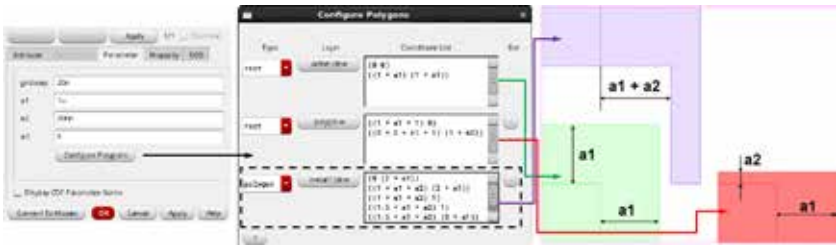



**Рис. 1.** Пример использования динамической формы для ПЯ

На рисунке один из кластеров выделен пунктирной линией.

Таким образом, собрав универсальную ПЯ с удобным интерфейсом для конфигурации, для создания большого набора ячеек с разной геометрией можно подключить необходимое количество сотрудников. Таким образом, нами были созданы библиотеки ячеек для тестов технологических правил за максимально короткое время. Данные библиотеки сделаны для перспективной технологии 28 нм АО «НИИМЭ».

***Литература***

1. Тюрин А. В., Надин А. С., Кириллов М. А., Шипицин Д. С., Анализ методов разработки параметризированных топологических представлений базовых аналоговых примитивов в среде проектирования СБИС // Форум «Микроэлектроника-2019».
2. Красников Г. Я., Лукасевич М. И., Морозов В. Ф., Савенков В. Н. Способ изготовления БИКМОП прибора. Патент на изобретение RU 2141148 C1, 10.11.1999. Заявка № 98112952/28 от 09.07.1998.

УДК 621.3.049.771.14 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.384.386

# Оценка зависимости характеристик стандартных цифровых элементов от параметров топологического конструктива для технологии КМОП 28 нм

## Assessing the Dependence of Standard Cells Characteristics on the Layout Template Parameters for 28 nm CMOS Technology

**Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., к. т. н., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dkopeikin@niime.ru*

**Ilin S. A., Kopeikin D. Yu., Lastochkin O. V., Ph.D, Shipitsin D. S., Ph.D**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dkopeikin@niime.ru*

Выполнен сравнительный анализ характеристик стандартных ячеек для разных длин канала приборов: с длиной канала транзистора 30 и 40 нм, шага регулярной структуры 140 нм, с разными опциями порогового напряжения; дана оценка изменения характеристик стандартных ячеек в зависимости от высоты топологического конструктива.
**Ключевые слова:** библиотеки стандартных цифровых элементов; пороговое напряжение; КМОП; регулярная структура; высота ячейки; топологический конструктив.

The paper gives a comparative analysis of the characteristics of standard cells for different channel lengths of devices, with a transistor channel length of 30 and 40 nm, a step of a regular structure of 140 nm with different threshold voltage options. Besides, it offers an assessment of the change in the characteristics of standard cells depending on the height of the topological structure.
**Keywords:** standard cell libraries; threshold voltage; CMOS; regular structure; cell height; layout template.

Постоянный прогресс полупроводниковых технологий приводит к усложнению средств проектирования: расширение спектра доступных технологических опций и ограничений приводит к необходимости учета особенностей технологии на ранних этапах проектирования.

Характеристики стандартных ячеек определяются приборным базисом [1]. Технологии уровня 28 нм предоставили новые возможности для разработчиков: широкий диапазон пороговых напряжений ($V_{th}$), управление характеристиками за счет вариаций длины канала (L) и расстояния между затворами (P) [2]. В общем случае повышение $V_{th}$ при прочих равных условиях приводит к снижению быстродействия и энергопотребления, понижение — к обратному эффекту.

Для уменьшения токов утечки используются:

- увеличение расстояния между затворами (P);
- увеличение длины канала (L).

Базовыми опциями для библиотек по технологии КМОП 28 нм являются $V_{th}$ = SVT, L = 35 нм и P = 135 нм [3].

В ходе исследований установлена зависимость характеристик КГ от параметра L. Полученные значения сравнивались с базовыми для соответствующих опций порогового напряжения.

**Таблица 1.** Изменение характеристик КГ в сравнении с вариантом P135L35 для одних $V_{TH}$, %

| Pitch | Length | | Frequency | Power | Leakage |
|---|---|---|---|---|---|
| 140 | 30 | UHVT | +18 | +32 | +150 |
| | | HVT | +15 | +28 | +179 |
| | | SVT | +21 | +48 | +371 |
| | | LVT | +20 | +69 | +412 |
| | | ULVT | +16 | +107 | +424 |
| | 40 | UHVT | −9 | −14 | −29 |
| | | HVT | −8 | −12 | −32 |
| | | SVT | −9 | −15 | −50 |
| | | LVT | −12 | −23 | −57 |
| | | ULVT | −8 | −19 | −59 |

В табл. 1 показаны изменения характеристик стандартных ячеек при изменении параметров P и L для общих $V_{TH}$. Хорошо видно, что P = 140 нм / L = 30 нм показывает более высокое быстродействие, а вариант с P = 140 нм и L = 40 нм — более низкую мощность и утечку.

В ходе проведенного исследования были разработаны четыре варианта библиотеки для опции SVT35 [4] с разной высотой, т. е. топологическим конструктивом 7, 9, 12 «треков», и проведен синтез блоков из наборов ISCAS. Библиотека с опцией 7t позволила уменьшить площадь тестовых проектов, потребляемую мощность и мощность утечки на 5, 23 и 26 % соответственно при снижении частоты на 13 %. Библиотека 12t увеличила быстродействие в среднем на 9 % за счет увеличения площади, мощности и утечки на 18, 22 и 23 %.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- дана оценка изменения результатов структурного синтеза в базисе библиотеки с L = 35 нм, $V_{th}$ = SVT для разных вариантов высоты ячейки (количества треков «треков»);
- выполнено сравнение результатов работы КГ для разных опций $V_{th}$ и L для P = 140 нм.

В результате проведенного исследования разработан набор из десяти библиотек стандартных цифровых элементов для разных сочетаний длины канала транзистора и порогового напряжения для увеличенного по сравнению с базовым шага регулярной структуры затворов. Предложенный набор библиотек совместим в рамках одного проекта. Выполнена генерация технологических представлений, используемых в общем маршруте автоматизированного цифрового синтеза.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2-х частях. — Москва, 2004. — Часть 2.
2. Красников Г. Я., Шелепин Н. А., Шипицин Д. С., Игнатов П. В. Особенности технологии, компонентов и библиотек уровня 28 нм // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. — С. 45–47.
3. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Шипицин Д. С. Сравнительный анализ параметров стандартных цифровых элементов на примере библиотек в базисе технологии КМОП 28 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4(99). — С. 268–271. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.268.271.
4. Коротких С. А. Методы автоматизации отдельных этапов маршрута проектирования библиотек стандартных цифровых элементов // XIII Международная конференция «Кремний-2020». XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе: Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Ялта, 21–25 сентября 2020 г. / Под ред. Е. С. Горнева. — Москва: МАКС Пресс, 2020. — 324 с.: ил. — С. 191–193.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.387.390

# Исследование способов учета влияния стресса атомной решетки кремния в SPICE-моделях глубоко-субмикронных МОП-транзисторов

## Ways of Taking into Account the Influence of Atomic Lattice Stress in SPICE Models of Silicon Deep-submicron MOS Transistors

**Шипицин Д. С., к. ф.-м. н., Потупчик А. Г., Шемякин А. В.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*dshipitsin@niime.ru, apotupchik@niime.ru, ashemyakin@niime.ru*

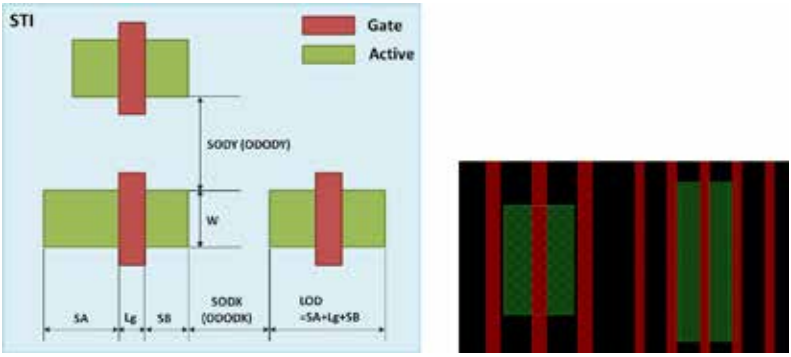
**Shipitsin D. S., Ph.D, Potupchik A. G., Shemyakin A. V.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*dshipitsin@niime.ru, apotupchik@niime.ru, ashemyakin@niime.ru*

Основным производным фактором т. н. эффектов близости в глубоко-субмикронных МОП-транзисторах является стресс атомной решетки кремния. Произведен обзор и анализ возможных вариантов учета данного фактора в компактных моделях.
**Ключевые слова:** LDE-эффекты; МОП-транзистор; SPICE-параметры; моделирование; BSIM4; тестовая структура; экстракция.

Mechanical stress of atomic lattice is the main factor caused by the geometry of deep submicron MOSFET transistor and its neighborhood. A review and analysis of possible options for taking this factor into account in SPICE-models has been carried out.
**Keywords:** LDE; MOSFET; SPICE-parameters; simulation; test structure; parameter extraction.

Основные с точки зрения влияния на электрофизические параметры транзистора эффекты близости (LDE-эффекты), такие как LOD и OSE [1] в глубоко-субмикронных МОП-транзисторах [2], продуцируют стресс атомной решетки кремния в области канала, что, в свою очередь, обуславливает изменение величины параметра подвижности носителей заряда. Исключением является эффект WPE, в статье он рассматриваться по данной причине не будет.

Поскольку влияние стресса на электрофизические характеристики приборов значительно (изменение тока стока в открытом состоянии, например, может достигать 30%), при разработке ИС необходимым условием является его учет в SPICE-модели. Существуют различные варианты имплементации обозначенных эффектов в ядро модели. Базовый — использование встроенной в BSIM4 модели стресса. Однако данная модель является феноменологической, т. е. описание эффекта в BSIM4 имеет недостатки. При этом данный подход также ограничен: его практически невозможно использовать для прогнозирования LDE в более прогрессивных технологиях. Обычно в моделях транзисторов уровня 28 нм встроенная в BSIM4 модель стресса не используется.




*а* *б*

**Рис. 1.** Схематичное изображение LOD, WIDTH, ODOX и ODOY (*а*) и схематичное изображение топологии (*б*)

В связи с этим наиболее подходящий подход к учету LDE-эффектов, возникающих в транзисторах, изготовленных с нормами проектирования 28 нм, — разработка макромодели на базе ядра BSIM4, описывающей физику механического стресса. Точность создаваемой компактной модели при этом обеспечивает возможность ее использования в т. ч. и для транзисторов, выполненных по планарной технологии с нормами проектирования вплоть до 20 нм.

Предлагаемая макромодель должна обеспечивать учет LOD- и OSE-эффектов одновременно в зависимости от следующих параметров:

- LOD (LOD = SA+Lg+SB);
- ширины активной области транзистора (W);
- ширины STI в продольном направлении (ODODX);
- ширины STI в поперечном направлении (ODODY).

Иллюстрации к перечисленным размерностям представлены на рис. 1.

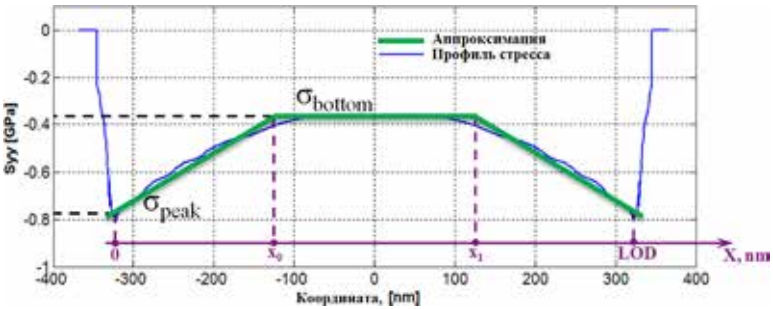



**Рис. 2.** Трапециевидная аппроксимация профиля стресса

Для описания профиля механического стресса необходимо использовать ряд аппроксимаций (упрощение функций, разложение в ряд Тейлора и проч.), чтобы иметь возможность интеграции макромодели в синтаксис симулятора SPECTRE.

Взятая за основу модель поведения кремния как пьезоэлектрического материала (перераспределение заряда в условиях действующего механического стресса) решается для случая приближения профиля стресса в активной зоне транзистора в виде трапеции (рис. 2). В пьезоэлектрической модели подвижность вычисляется с использованием стандартного пьезоэлектрического соотношения

$$\frac{M}{\mu_0} = \vec{\Pi} \cdot \vec{\sigma},$$

где $\mu_0$ — это изотропная подвижность без напряжения, $\vec{\sigma}$ — это приложенное напряжение, $\vec{\Pi}$ — пьезоэлектрический тензор. Известно, что более точные результаты могут быть получены с использованием модели зонной деформации. Однако в случае базиса 28 нм действующее значение механических напряжений в решетке не превышает 2 ГПа.

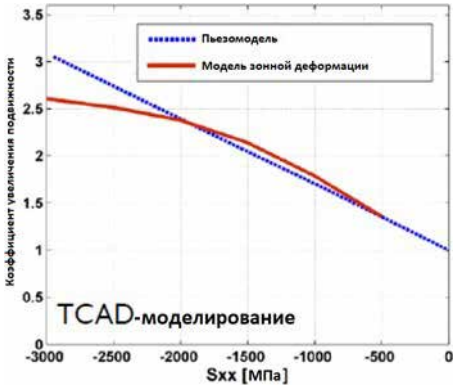



**Рис. 3.** Сравнение между моделями пьезорезистивной подвижности и подвижности зонной деформации

На рис. 3 иллюстрируется сходимость результатов, полученных с использованием обеих моделей в указанном интервале напряжений. Параметры модели BSIM4, имеющие прямой физический смысл (такие как vth0 и u0 и др.), принимают в модели вид выражения, учитывающего параметры конструкции транзистора и его окружения (рис. 4).

Использование разработанных с применением вышеописанного подхода SPICE-моделей позволяет формировать заключение о качественном воспроизведении эффектов LOD и OSE. Дрейф основных электрофизических параметров транзистора (Ion, Vth, Ileak и др.) воспроизводится корректно, данные моделирования согласуются как с данными литературных источников [3], так и с данными эксперимента (рис. 5).

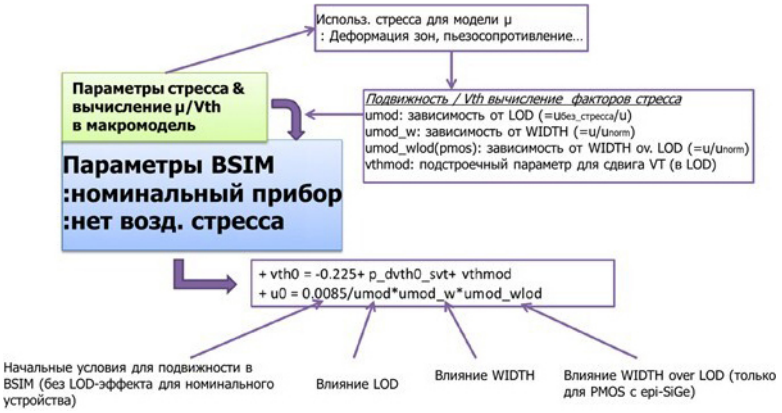



**Рис. 4.** Пример учета LDE в макромодели

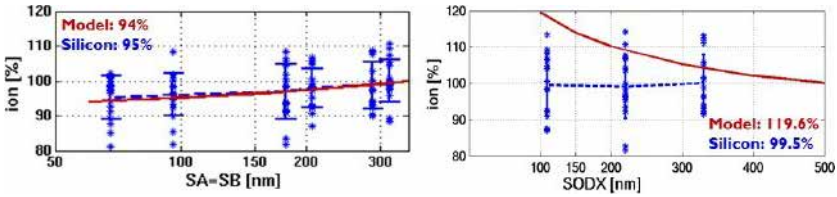



**Рис. 5.** Сравнение Ion между моделью и экспериментом NMOS-транзистора

***Литература***

1. Davis W. R. and Demircioglu H. Modeling Layout-Dependent Stress Effects: Opportunities for Open DFM. NC State University.
2. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — Москва: ТЕХНОСФЕРА 2011. — С. 441–444.
3. Faricelli J. V. Layout-Dependent Proximity Effects in Deep Nanoscale CMOS // 2010 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, San Jose, CA, 2010. P. 1–8.

УДК 532.526 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.391.392

# Тепловое моделирование работы 1,4-кВт импульсного усилителя мощности с применением модели турбулентности Ментера — Лангтри в оригинальной программе AliceFlow

## Thermal Simulation of a 1.4 kW Pulsed Power Amplifier Using AliceFlow Software with Langtry — Menter Turbulence Model

**Иванов К. А., Редька Ал. В.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*

**Ivanov K. A., Redka Al. V.**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*

В статье рассматривается верификация реализованной в оригинальной программе AliceFlow [1] модели ламинарно-турбулентного перехода Ментера — Лангтри [2] с четырьмя уравнениями переноса для расчета турбулентных характеристик. Производится сравнение программы AliceFlow с программой ANSYS Icepak на примере расчета задачи воздушного охлаждения модуля с тепловой мощностью 1,4 кВт при использовании модели турбулентности Ментера — Лангтри.
**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика; турбулентность; модель Ментера-Лангтри; конвективный теплообмен.

The paper discusses the verification of the Langtry — Menter 4-equation transitional shear stress transport turbulence model [2], implemented in the AliceFlow software [1]. A comparison of the AliceFlow and the ANSYS Icepak software performance with the Langtry — Menter turbulence model has been made based on the calculation of air cooling processes of a module with a thermal power of 1,4 kW.
**Keywords:** computational hydrodynamics; turbulence; Langtry — Menter model; convective; heat transfer.

Многие встречающиеся на практике течения воздушных потоков в радиаторах охлаждения являются турбулентными. Перед инженером стоит задача по возможности наиболее точно воспроизвести физику явления турбулентности с учетом существующих ограничений на время проведения теплового анализа. Модель SST Ментера с двумя уравнениями переноса в переменных k-ω сочетает в себе достоинства k-ε-моделей в ядре потока и k-ω-моделей вблизи твердых стенок. Надстройка над SST k-ω-моделью — модель ламинарно-турбулентного перехода Ментера — Лангтри с четырьмя уравнениями переноса для турбулентных характеристик, более точно учитывает физику турбулентных течений по сравнению с моделью SST Ментора. В программе AliceFlow реализована модель Ментера — Лангтри. Данная статья посвящена проверке работоспособности модели Ментера — Лангтри в программе AliceFlow и сравнению результатов моделирования в программе AliceFlow с программой ANSYS Icepak.

Произведен теоретический расчет, использующий математическое моделирование применительно к задаче теплового расчета амплитрона. Были использованы

SIMPLE-алгоритм С. Патанкара, монотонизатор Рхи — Чоу, схема третьего порядка SMARTER, модель турбулентности SST Ментера и Лангтри. В результате применения приведенного в статье алгоритма расчета теплового состояния был смоделирован процесс охлаждения усилителя мощности на основе амплитрона воздушным потоком при расходе теплоносителя 100 $м^3$/ч на входе в расчетную область. Применение указанного в статье алгоритма расчета позволило существенно упростить тепловой расчет режимов работы усилителя мощности на основе амплитрона.

Программа AliceFlow [1] может применяться для расчета тепловых режимов работы комплексированных изделий, включающих в свой состав как твердотельные субмодули, так и усилители на основе электровакуумных изделий.

Отличие от программы ANSYS Icepak 2019R1 составило не более 17 % по перегреву корпуса усилителя СВЧ-мощности. Перепад давления воздуха между входом и выходом в двух программах отличается не более чем в 1,27 раза.

***Литература***

1. https://github.com/kirill7785/AliceFlow.
2. https://turbmodels.larc.nasa.gov/langtrymenter_4eqn.html.

Many of the air flows in cooling radiators are in fact turbulent. So engineers performing the thermal analysis should be able to reproduce the physics of the turbulence phenomenon as accurately as possible, taking into account the existing restrictions. The Menter SST model with two transport equations in k-ω variables combines the advantages of k-ε models in the flow core and k-ω models near solid walls. The Langtry — Menter 4-equation transitional shear stress transport turbulence model, as an addition to the SST k-ω model, more accurately takes into account the physics of turbulence in comparison with the Menter SST model. The Menter — Langtry model is implemented in the AliceFlow software. This article is dedicated to assessing the performance of the Menter — Langtry model in the AliceFlow and comparing the simulation results in the AliceFlow with the ones in the ANSYS Icepak.

We used mathematical simulation to make calculations for the thermal design of an amplitron. We used the SIMPLE algorithm of S. Patankar, the Rhie-Chow monotonizer, the third-order SMARTER scheme and the Menter — Langtry SST turbulence model. The algorithm for calculating the thermal state presented here was used to simulate the air cooling of an amplitron-based power amplifier at a coolant flow rate of 100 $m^3$/h at the input. The algorithm makes it possible to significantly simplify the thermal design of an amplitron-based power amplifier.

The AliceFlow software [1] can be used to calculate thermal modes of integrated devices comprising both solid-state modules and vacuum tube amplifiers.

The results of the microwave power amplifier case overheating simulation in the AliceFlow came out no more than 17 % different from the ones in the ANSYS Icepak 2019R1. The differential pressure between the input and the output in the two simulation programs differs by no more than 1.27 times.

***References***

1. AliceFlow software, available at: https://github.com/kirill7785/AliceFlow.
2. The Langtry-Menter 4-equation transitional SST model, available at: https://turbmodels.larc.nasa.gov/langtrymenter_4eqn.html.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.393.394

# Создание отечественных САПР для проектирования СВЧ-устройств и полупроводниковых ИС: проблемы и возможности

## Developing of CAD Systems for Designing Microwave Devices and MMICs in Russia — Difficulties and Opportunities

**Бабак Л. И.[1], д. т. н., Завалин Ю. В.[2]**
*[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*
*[2] АО «НИИМА «Прогресс»*
*125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54*
*leonid.babak@mail.ru*

**Babak L. I.[1], Sc.D, Zavalin Yu. V.[2]**
*[1] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR University)*
*40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia*
*[2] Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC ("PROGRESS MRI" JSC)*
*54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia*
*leonid.babak@mail.ru*

Рассматриваются функции и состав зарубежных САПР СВЧ, а также имеющийся потенциал и разработки в этом направлении в России. Анализируются существующие проблемы, формулируются требования, оцениваются возможности и предлагаются направления создания комплекса отечественных САПР для проектирования СВЧ-устройств и полупроводниковых ИС на базе единой программной платформы.

**Ключевые слова:** САПР; СВЧ-устройства; гибридные и монолитные ИС; программные модули.

В нашей стране отсутствуют системы автоматизированного проектирования (САПР) для разработки СВЧ радиоэлектронных устройств, выполняемых, в частности, на основе технологий полупроводниковых (монолитных — МИС) и гибридных (ГИС) интегральных схем (ИС), а также печатного монтажа. Создание отечественных САПР СВЧ в современных условиях является критически важной задачей, решение которой в рамках программы импортозамещения будет способствовать повышению независимости и конкурентноспособности российской радиоэлектронной промышленности.

К основным составляющим современной универсальной САПР СВЧ-устройств относятся интерфейс пользователя для управления процессом проектирования, схемный и топологический редакторы, подсистемы схемотехнического моделирования линейных и нелинейных СВЧ РЭУ, электромагнитного (ЭМ) моделирования планарных и объемных (волноводных) узлов, обработки и отображения результатов моделирования, средства оптимизации устройств и др. Кроме того, важными для осуществления проектирования СВЧ РЭУ на отечественных предприятиях являются возможности использования в САПР библиотеки базовых (стандартных) СВЧ-элементов с типовыми моделями и специальных библиотек,

содержащих модели интегральных элементов и дискретных навесных компонентов для конкретных технологий предприятия — изготовителя ИС и компонентов.

В качестве прототипов программных систем для проектирования СВЧ GaAs/GaN МИС, ГИС и печатных СВЧ-узлов могут рассматриваться наиболее распространенные в мире универсальные САПР СВЧ-устройств ADS и Microwave Office, для проектирования кремниевых аналоговых СВЧ ИС на основе технологий КМОП на объемном кремнии, КНИ и SiGe БиКМОП — САПР Cadence Virtuoso совместно с ADS или Microwave Office, а для 2D / 2.5D / 3D-моделирования и проектирования планарных и объемных (волноводных) СВЧ-узлов — САПР EMPro, HFSS и др.

Анализ показывает, что в настоящее время в России имеются научные коллективы и специалисты, которые разрабатывают либо имеют опыт разработок программных систем в рассматриваемой области. В совокупности опыт этих коллективов охватывает значительную часть направлений по созданию отечественной САПР СВЧ. К таким направлениям относятся, в частности, разработка и тестирование больших программных систем для технических отраслей, программных модулей моделирования РЭУ в частотной и временной областях, схемных редакторов, 2D и 3D ЭМ-моделирования, оптимизации, отображения результатов моделирования, построения библиотек моделей интегральных и дискретных СВЧ-элементов и др.

Среди существующих проблем, помимо необходимости координирования и интеграции работ указанных научных групп, необходимо отметить дефицит специалистов по некоторым направлениям, отсутствие целенаправленной государственной политики по финансовой и иной поддержке научных исследований, разработок, распространения и сопровождения отечественных САПР, а также проблему с квалифицированными кадрами (особенно молодежью). Последняя проблема должна решаться путем восстановления и развития в вузах образовательных и научно-исследовательских программ по созданию САПР РЭУ. При этом должны приниматься срочные решения по всем указанным проблемам в связи с угрозой потери пока еще имеющегося отечественного потенциала из-за естественного старения кадров и в результате безнадежного отставания в рассматриваемой области от передовых зарубежных стран.

В докладе предлагается создание комплекса отечественных САПР для проектирования СВЧ-устройств и полупроводниковых ИС на базе единой программной платформы. Это позволит использовать унифицированные решения, обеспечить совместимость систем по архитектуре, данным и моделям, уменьшить затраты и время на разработку, облегчить освоение и эксплуатацию. Программная платформа представляет собой ряд взаимодействующих и полностью совместимых между собой подсистем и программных модулей. На ее основе могут быть созданы:

- САПР для проектирования СВЧ-устройств на базе технологий GaAs/GaN МИС, ГИС и печатного монтажа;
- САПР для проектирования СВЧ ИС и СнК на базе кремниевых технологий Si/КНИ/SiGe;
- САПР для 2D / 2.5D / 3D ЭМ-моделирования фрагментов СВЧ ИС, печатных и волноводных узлов СВЧ-устройств.

УДК 621.3.049.77 + 004.032.34 + 004.312 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.395.397

# Реализация синтеза самосинхронных схем в базисе БМК

## Implementing Self-timed Circuit Synthesis in Gate Array Basis

**Плеханов Л. П.[1], к. т. н., Денисов А. Н.[2], к. т. н., Дьяченко Ю. Г.[1], к. т. н., Мамонов Д. И.[2], Морозов Н. В.[1], Степченков Д. Ю.[1]**
*[1] ФИЦ «Информатика и управление» РАН*
*119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2*
*lplekhanov@inbox.ru*
*[2] НПК «Технологический центр»*
*244980, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, 5*
*den@tcen.ru*

**Plekhanov L. P.[1], Ph.D, Denisov A. N.[2], Ph.D, Diachenko Yu. G.[1], Ph.D, Mamonov D. I.[2], Morozov N. V.[1], Stepchenkov D. Y.[1]**
*[1] Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences*
*44/2 Vavilova St., Moscow, 119333*
*lplekhanov@inbox.ru*
*[2] "Technological Centre" SMC*
*5 Lane 4806, Zelenograd, Moscow, 244980*
*den@tcen.ru*

Доклад посвящен реализации автоматизированного синтеза самосинхронных (СС) схем на основе описания схемы на языке Verilog и библиотеки стандартных элементов 5503СС, расширенной специфичными для СС-схем элементами. Программа синтеза имеет графический интерфейс и интегрируется в САПР полузаказных БИС «Ковчег» (МИЭТ).
**Ключевые слова:** самосинхронные схемы; автоматизированный синтез; индикация; маршрут проектирования.

The report describes automated self-timed (ST) circuit synthesis implementation based on the circuit's Verilog-description and the standard cell library 5503CC, extended with the cells specific to ST circuits. The synthesis program has a graphic user interface. It is integrated into gate array CAD "Kovcheg" (MIET).
**Keywords:** self-timed circuits; automated synthesis; indication; design flow.

В докладе описывается реализация программы синтеза самосинхронных схем (СС) в рамках САПР электронных схем [1] на основе *базовой библиотеки*, включающей комбинационные элементы и СС-триггеры.

Для синтеза задаются:

- описание схемы любого уровня на языке Verilog,
- параметры синтеза.

Основной критерий синтеза — минимальная сложность СС-схемы и учет реальной нагрузки на выходе каждого элемента, включая паразитные емкости трасс.

Процедура синтеза состоит из нескольких этапов:

- преобразование алгоритмического описания схемы в систему логических функций,

- перевод функций в парафазный (ПФ) или бифазный код [1],
- подбор библиотечных элементов для реализации функций,
- организация индикации всей схемы.

Для генерации системы логических функций используется программа с открытым кодом Yosys. Далее функции укрупняются путем подстановок так, чтобы в базовой библиотеке нашлись элементы для их реализации, и дуализируются. Регистры и счетчики формируются из СС-триггеров базовой библиотеки в соответствии с заданием на синтез.

Информация о соответствии нагрузок элементов их нагрузочной способности предоставляется пользователю. Программа синтеза позволяет:

- усилить все элементы со слишком слабым выходом,
- усилить элементы, указанные пользователем.

Помимо типовых стандартных логических элементов, базовая библиотека должна включать СС-элементы:

- двухвходовой Г-триггер,
- триггер хранения,
- разряд регистра сдвига,
- счетный триггер.

Сравнение синтезированных СС-схем с результатами ручного проектирования показывает, что комбинационные СС-схемы получаются на 10–30 % сложнее спроектированных вручную, а последовательностные схемы практически идентичны.

***Исследование выполнено в рамках государственного задания № 0063-2019-0010.***

***Литература***

1. Плеханов Л. П., Денисов А. Н., Дьяченко Ю. Г., Степченков Ю. А., Мамонов Д. И., Степченков Д. Ю. Синтез самосинхронных схем в базисе БМК / Научная конференция «Микроэлектроника — ЭКБ и электронные модули». Алушта (Республика Крым), 30.09–05.10.2019 — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — С. 450–454.

The paper discusses implementing self-timed (ST) circuit synthesis [1] using a *base library*, including combinational cells and ST triggers.

The circuit's Verilog description and some options are the input data for synthesis.

The primary criterion is the minimum complexity, considering the actual cell's load, including traces' parasitic capacitance.

The synthesis procedure consists of the following stages:

- transforming the circuit's algorithmic description into a logical function system,
- function dualization [1],
- covering functions by library cells,
- organizing the circuit's indication.

At the first stage, the built-in open-source program Yosys generates the logical function system. Further, the functions are composed of substitutions to be covered by the base library cells. The synthesis program generates registers and counters from the base library ST triggers according the synthesis task.

The synthesis procedure provides information to the user about the compliance of each cell's load with its load capacity. The synthesis program can do the following:

- amplify all the cells with a weak load capacity,
- amplify the ST circuit's cells specified by the user.

In addition to typical standard logical cells, the base library should include the ST cells:

- two-input H-trigger,
- storage trigger,
- shift register bit,
- counting trigger.

Comparative analysis shows that synthesized combinational ST circuits have higher complexity by 10–30 % than those made by designers. In contrast, the sequential circuits are practically identical.

***The study was carried out within the framework of state assignment № 0063-2019-0010.***

***References***

1. Plekhanov L. P., Denisov A. N., Dyachenko Yu. G., Stepchenkov Yu. A., Mamonov D. I., Stepchenkov D. Yu. Sintez samosinhronnyh skhem v bazise BMK / Nauchnaya konferenciya «Mikroelektronika — EKB i elektronnye moduli». Alushta (Respublika Krym), 30.09-05.10.2019 — M.: Tekhnosfera, 2019. P. 450–454.

УДК 621.382.2/.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.398

# Особенности маршрута проектирования СнК с низким энергопотреблением по технологическим нормам 22 нм

## Specifics 22-nm Low Power Technology Node for Building Low Power SoC

**Фатеев И. А.**
*АО «НИИМА «Прогресс»*
*125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54*
*fateev@mri-progress.ru*

**Fateev I. A.**
*Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC ("PROGRESS MRI" JSC)*
*54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia*
*fateev@mri-progress.ru*

Данная работа посвящена исследованию влияния параметров стандартных библиотечных ячеек, выполненных по технологическому процессу 22LP нм TSMC, на потребление, быстродействие и занимаемую площадь. В работе представлен маршрут логического синтеза в различные библиотечные базисы, в которых варьируются длины каналов, пороговые напряжения и их различные комбинации для получения наиболее энергоэффективного решения.
**Ключевые слова:** логический синтез; TSMC 22; проектирование СнК.

This work is devoted to the study of the influence of the parameters of standard library cells designed for the TSMC 22LP nm technological process on consumption, performance and occupied area. The paper presents the route of logical synthesis into various library sets, in which the channel lengths, threshold voltages and their combinations vary to build most power efficient scheme.
**Keywords:** logical synthesis; TSMC 22; designing SoC.

Развитие систем обработки данных ведет к развитию полупроводниковых технологий и к уменьшению размеров отдельных транзисторов до единиц нанометров. При этом вследствие уменьшения размеров растут токи утечки, уменьшаются напряжения питания. Также на первый план выходят эффекты локального нагрева, падения напряжения на проводниках и электромиграции.

На текущий момент потребляемая мощность является сдерживающим фактором развития как высокопроизводительных микроэлектронных систем, так и мобильных устройств. Огромное число микросхем создаются для применения в системах с батарейным автономным питанием, к которым предъявляются повышенные требования по энергоэффективности и снижению как динамической, так и статической потребляемой мощности.

На текущий момент крупные поставщики библиотек стандартных элементов предлагают множество различных вариантов поставок. Так, для 22/28 нм предлагаются библиотеки с разными длинами каналов транзисторов от 30 до 40 нм. Дополнительно существует возможность выбрать из пяти различных пороговых напряжений. Таким образом, выбирая варианты параметров из различных комбинаций, можно найти оптимальный набор элементов для определенной схемы с целевой производительностью и определенной потребляемой мощностью.

УДК 621.372.061 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.399.400

# Стратегия многоточечной генерации матриц проектирования в задачах редукции моделей для схемотехнического анализа

## The Strategy of Multipoint Generation of the Projection Matrices in the Problems of Model Order Reduction for Circuit Simulation

**Гурарий М. М., Русаков С. Г., Ульянов С. Л.**
*Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)*
*124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3*

**Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L.**
*Institut for Design Problems in Microelectronics RAS (IPPM RAS)*
*3 Sovetskaya St., Zelenograd, Moscow, 124365*

Обсуждается адаптивная процедура редукции моделей на базе многоточечного проекционного подхода с определением частотных точек для базисных векторов при текущем контроле ошибок. Представлены численные экспериментальные результаты.
**Ключевые слова:** методы редукции моделей; многоточечные проекционные методы; линейные системы; передаточные функции.

The paper considers an adaptive procedure for model order reduction is based on a multipoint projection approach with the determination of frequency points for the basis vectors under the current error control.
**Keywords:** model order reduction; multipoint projection methods; linear systems; transfer functions.

В рамках развития проекционных методов редукции моделей обсуждается вычислительный подход с многоточечным формированием базиса матрицы проектирования.

Цель редукции моделей в САПР СБИС состоит в том, чтобы автоматически генерировать упрощенные модели существенно меньшей размерности, чем исходные полные модели, сохранив необходимую точность приближения при описании поведения.

В области автоматизации схемотехнического проектирования развитие методов редукции получило ускорение в связи с высокой практической востребованностью и различием типов высокоразмерных задач, требующих решения в автоматическом режиме. На современном этапе развития средств моделирования САПР СБИС к алгоритмам редукции моделей для их включения в маршруты САПР предъявляется набор достаточно жестких требований. В их числе: точность, устойчивость, пассивность, сохранение структуры, схемная реализуемость, сохранение исходных параметров. Эти требования являются мотивацией совершенствования методов и алгоритмов редукции моделей.

Проекционные методы стали одним из ведущих направлений разработки алгоритмов редукции. Наибольшее развитие получили алгоритмы на базе методов крыловских подпространств [1]. Методы крыловских подпространств широко используются для редукции моделей различных типов задач благодаря своей простоте и низкой вычислительной стоимости. Однако решение практических задач

показало [1], что аппроксимации, полученные методами крыловских подпространств, как правило, избыточны.

Цель обсуждаемого алгоритма — учесть механизм избыточности при конструировании алгоритма редукции. Основная идея конструирования алгоритма — использовать многоточечный подход и сформировать матрицы проектирования последовательным выбором векторов с минимальной линейной зависимостью от предыдущего построенного базиса. Для генерации базиса применяется адаптивная процедура определения частотных точек, соответствующих максимальной текущей ошибке редуцированной модели. Норма ошибки используется как критерий завершения процесса редукции в соответствии с заданной пользователем погрешностью редуцированной модели. Разработанный алгоритм генерации базисных векторов матриц проектирования обеспечивает в сравнении со стандартными методами редукции снижение избыточности упрощенных моделей в среднем на 40 %.

***Литература***

1. Schilders W. H. A., van der Vorstand H. A. and Rommes J. (eds.), Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2008.

УДК 621.396.6 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.401.403

# Гетерогенная интеграция — новая эра многофункциональных устройств радиоэлектроники на разнородных полупроводниковых материалах

## Heterogeneous Integration — a New Era of Multifunctional Radio Electronics Devices Based on Heterogeneous Semiconductor Materials

**Борисов А. А., д. т. н., Буробин В. А., к. т. н.**
*АО «НПП «Исток» им. Шокина»*
*141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а*
*vabpulsar@mail.ru*

**Borisov A. A., Sc.D, Burobin V. A., Ph.D**
*"Istok" Shokin RPC JSC*
*2a Vokzalnaya St., Fryazino, 141195*
*vabpulsar@mail.ru*

Благодаря эпитаксиальной инженерии кристаллических структур появился ряд новых многокомпонентных полупроводниковых материалов, улучшенные свойства которых предлагают значительное повышение производительности по сравнению с кремнием. Способность использовать передовые свойства всего диапазона полупроводниковых материалов, выбирать их оптимальную комбинацию, а не делать ставку на единственный лучший материал позволит преодолеть возникающие сложные проблемы при объединении различных семейств полупроводниковых материалов. Достигнутый прогресс технологий гетероинтеграции в объединении качественно различных полупроводниковых материалов нового класса позволяет обеспечить наилучшую общую производительность устройств высокотехнологичных многофункциональных микросистем.
**Ключевые слова:** гетероинтеграция; гетерогенные полупроводники; многофункциональная микросистема; технология.

Through epitaxial crystal engineering, a number of new multicomponent semiconductor materials have emerged whose improved properties offer significant performance improvements over silicon. The ability to use the advanced properties of the entire range of semiconductor materials, to choose the optimal combination, rather than relying on the only one best material, will overcome the complex problems that arise when combining different families of semiconductor materials. The progress achieved in heterointegration technologies in combining qualitatively different semiconductor materials of a new class allows providing the best overall performance of devices of high-tech multifunctional microsystems. Welcome to the world of advanced heterointegrated semiconductors.
**Keywords:** heterointegration; compound semiconductor materials; multifunctional microsystem; technology.

Каким бы впечатляющим ни было влияние кремния, он обладает очень простым и ограниченным набором свойств, которые ограничивают его применение

во многих новых и развивающихся областях технологий, которые требуют сверхвысоких уровней производительности наряду с сенсорными и другими возможностями. Новейшие открытия в области естественных наук предполагают понимание того, что в основе многих достижений, связанных с комбинированием существенно различающихся полупроводниковых материалов, лежит компромисс и выбор между ними делается с учетом того, какие из них обеспечат наилучшую общую производительность микроэлектронных устройств [1].

***Три источника и три этапа развития гетерогенной интеграции***

В первой части рассматриваются вопросы реализации высокой плотности интеграции высокотехнологичных узлов в приемо-передающих устройствах, а также использования преимуществ широкозонных полупроводников в фундаментальных свойствах материалов, таких как GaAs (арсенид галлия) и GaN (нитрид галлия). Производство этих устройств было обеспечено собственными подложками Si, GaAs и GaN. Путем атомной инженерии кристаллических структур появился и широко развивается ряд новых полупроводниковых материалов, улучшенные свойства которых предлагают значительные улучшения производительности по сравнению с кремнием [2].

Вторая часть посвящена дальнейшему масштабированию и функциональной диверсификации на основе интеграции кремния (Si) в качестве инородной подложки с другими материалами, такими как соединения $A^3B^5$ (например арсенид галлия (GaAs), нитрид галлия (GaN) и фосфид индия (InP) [3].

Развиваются программы, направленные на 3D-интеграцию в пределах одного кристалла функциональных элементов, созданных на основе различных технологий и материалов. Это позволит значительно улучшить характеристики военных и коммерческих систем при сохранении приемлемой стоимости, высокой надежности и стабильных рабочих характеристик.

Также расмотрены ключевые достижения в развитии устройств гетерогенной чиплетной интеграции в общем корпусе (System-in-Package, SiP) [4].

В третьей части представлены технологии развития гетероинтеграционных технологий, в которых устройства, имеющие резкие переходы и высокоэффективные материалы с различными постоянными решетки, используют гибридные склейки пластин для электрических соединений. С помощью склеивания пластин был создан целый ряд новых устройств, включая многопереходные солнечные элементы, силовые устройства с соединениями между материалами с широкой и узкой полосой пропускания, а также FET, в которых для увеличения теплоотведения используются алмазные слои. В последнем случае устройства были сформированы путем прямого соединения алмаза с полупроводниковыми материалами — в одном случае с кремнием, а в другом с GaAs, а также путем соединения алмаза с полупроводниковыми материалами [2].

В рамках «Стратегии развития электронной промышленности на период до 2030 года» предусмотрены кардинальные мероприятия по модернизации радиоэлектронного комплекса РФ, направленные на разработку прорывных промышленных технологий и формирование современной технологической инфраструктуры, необходимой для крупносерийного промышленного производства кристаллов транзисторов и МИС, СВЧ-модулей и радиоаппаратуры на основе гетероструктур

арсенида галлия и нитрида галлия на подложках карбида кремния (SiC) и кремния (Si) диаметром 200 мм для изготовления СВЧ- и силовой радиоэлектроники.

Достижения в области полупроводниковых технологий стимулируют инновации, которые приводят к появлению новых продуктов, новых предприятий и рабочих мест, а также совершенно новых отраслей.

***Литература***

1. Обзор современных технологий гетероинтеграции многокомпонентных полупроводниковых соединений $A^3B^5$ и кремниевых КМОП для внедрения на рынки оборонной и гражданской продукции. — Москва. ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 256 с.
2. Stevenson R. A new era beckons, with better devices that draw on the strengths of the entire palette of compound semiconductors. URL: www.compoundsemiconductor.net, 08 july 2021.
3. Интеграция технологий GaAs, GaN и Si-CMOS на единой подложке 200 мм Si посредством процесса многослойного переноса. Low Energy Electronic Systems (LEES); Singapore-MIT Alliance for Research and Technology, 2019.
4. Процесс развития химико-механической полировки (ХМП) на подложках $A^{III}B^{V}$ для 3D-нтеграции разнородных систем / Andrew Carter and Miguel Urteaga from teledyne scientific and imaging // International Microwave Simposium IMS2016, 22–27 May 2016, San Francisco, California.

УДК 621.396.6 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.404.405

*Светлой памяти Михаила Петровича Духновского посвящается*
*Dedicated to the blessed memory of Mikhail Petrovich Dukhnovsky*

# Особенности технологии изготовления и применения алмазных теплоотводов в электронных СВЧ-модулях

## Features of Manufacturing Technology and Diamond Heat Sinks Application in Electronic Microwave Modules

**Духновский М. П.,** **Смирнова А. К., к. т. н., Федоров Ю. Ю., к. ф.-м. н., Щербаков С. В., к. т. н.**
*АО «НПП «Исток» им. Шокина»*
*141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а*
*sam-22@mail.ru*

**Dukhnovsky M. P.,** **Smirnova A. K., Ph.D, Fedorov Yu. Yu., Ph.D, Shcherbakov S. V., Ph.D**
*"Istok" Shokin RPC JSC*
*2a Vokzalnaya St., Fryazino, 141190*
*sam-22@mail.ru*

Рассмотрены особенности CVD-технологии выращивания синтетических поликристаллических алмазов, их обработки и применения в качестве теплоотводящих элементов конструкций электронных сверхвысокочастотных модулей.
**Ключевые слова:** алмазный теплоотвод; электронный модуль; тепловое сопротивление; технология выращивания и обработки.

The paper considers the features of the CVD technology for growing synthetic polycrystalline diamonds, their processing and application as heat-removing elements of the structures of electronic microwave modules.
**Keywords:** diamond heat sink; electronic module; thermal resistance; growing and processing technology.

Алмаз занимает особое место среди всех известных на сегодняшний день материалов. Его «самые» уникальные свойства (твердость, теплопроводность, стойкость к агрессивным химическим средам и специальным факторам, слабая адгезия к разного рода налетам и покрытиям и др.) во многом предопределяют его использование в различных отраслях человеческой деятельности, в том числе в электронике. Поликристаллический (или технический) алмаз, как более дешевый, находит широкое применение в теплоотводах и теплоотводящих подложках, в то время как легированные электрически активными примесями монокристаллы алмаза являются основой создания нового класса электронных приборов — алмазных диодов, транзисторов, монолитных интегральных СВЧ-схем.

К сегодняшнему дню в нашей стране и за рубежом разработаны и развиваются способы, методы, оборудование и производственные мощности для роста и обработки искусственных монокристаллических и поликристаллических алмазов с высокой повторяемостью электрофизических и геометрических характеристик.

В представленном материале рассмотрен полный технологический цикл промышленного изготовления теплоотводящих элементов конструкции (ТЭК) СВЧ-модулей с плотной компоновкой комплектующих, включающий CVD-рост пластин поликристаллического алмаза, его обработку, разделение на элементы, формирование покрытий и применение. При этом алмазные ТЭК в составе электронных СВЧ-модулей играют роль тепловых буферов, предотвращая локальные перегревы активных СВЧ или силовых электронных компонентов (транзисторов, монолитных интегральных СВЧ-схем). Тепло из точек или линий локального разогрева полупроводниковых приборов, которыми, как правило, являются подзатворные области (области p-n-переходов), практически мгновенно равномерно распределяется по объему ТЭК, передавая затем тепло металлическим или композитным основаниям, корпусам или радиаторам, которые могут быть снабжены системами принудительного или кондуктивного охлаждения.

Одной из серьезных инженерных задач является обеспечение согласования тепловых сопротивлений на стыках активного элемента, ТЭК и основания. Приведен применяемый на практике алгоритм численного теплового моделирования ТЭК, а также конструктивные и технологические решения применения алмазных ТЭК в составе СВЧ-модулей.

Представленные производственно-технологические процессы и конструкторские решения алмазных ТЭК освоены в серийном производстве и совместно с расчетными алгоритмами широко используются в настоящее время при разработке и производстве современных СВЧ-модулей различного функционального назначения.

Дальнейшее развитие этого направления связано с разработкой новых материалов и методов автоматической сборки электронных СВЧ-модулей с элементами ТЭК.

***Литература***

1. Где растут алмазы // Наука из первых рук, 2008. — № 1 (19).
2. Ратникова А. К. Теплоотводящие подложки на основе поликристаллического CVD алмаза // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2011. — Вып. 3 (510). — С. 76–86.
3. Духновский М. П., Королев А. Н., Ратникова А. К., Рожков С. Е., Федоров Ю. Ю. Термическая шлифовка пластин CVD-алмаза для теплоотводов мощных полупроводниковых приборов // Электроника и электрооборудование транспорта, 2008. — № 6. — С. 25–28.

УДК 621.3.049.779 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.406.407

# Базовая технология изготовления СВЧ- и силовой электроники на основе GaN(Si)

## Basic Technology for the SHF and Power Electronics Production Based on GAN(Si)

**Ковалев А. А.[1], Егоркин В. И.[2]**
*[1] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Kovalev A. A.[1], Yegorkin V. I.[2]**
*[1] Zelenograd Nanotechnology Center JSC*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Рассмотрена технология GaN(Si), ее преимущества по сравнению с аналогами. Показаны возможности применения GaN-транзисторов в микроэлектронике, в том числе в гражданской электронике. Приведены параметры опытных образцов ЭКБ на GaN. Показаны производственные возможности АО «ЗНТЦ».
**Ключевые слова:** GaN(Si); СВЧ- и силовые транзисторы (HEMT); перспективные технологии.

В настоящее время кремниевые MOSFET- и IGBT-транзисторы практически полностью исчерпали свои возможности. Для обеспечения современных требований к техническим и функциональным возможностям силовой и СВЧ электроники необходимо использовать принципиально новые технологические решения, такие как нитрид-галлиевые (GaN) технологии.

Ключевым преимуществом GaN являются его электрофизические свойства: высокая подвижность и высокая скорость насыщения электронов, высокое пробивное напряжение, достаточно высокая рабочая температура и теплопроводность. Преимуществами нитрид-галлиевых полевых транзисторов являются достаточно большой диапазон рабочей частоты, большая по сравнению с кремниевыми транзисторами мощность, более высокий коэффициент полезного действия, а также меньшие размеры при одинаковых значениях сопротивления и пробивного напряжения. Отличительными особенностями GaN силовых ключей является высокая скорость переключения при минимальном времени обратного восстановления, что позволяет уменьшить потери и повысить эффективность. Нитрид-галлиевые транзисторы способны коммутировать напряжения в сотни вольт с длительностью переходных процессов в наносекундном диапазоне [2]. Это позволяет создавать на их основе мощные импульсные источники питания с большими выходными токами и рабочими частотами до сотен мегагерц. По мнению экспертов, использование GaN-транзисторов позволяет создавать компактную конечную продукцию, обладающую минимальными габаритными размерами.

Необходимо отметить, что разработка и выпуск электронной компонентной базы (ЭКБ) на GaN активно развиваются ведущими мировыми производителями микроэлектроники. При этом в России серийное производство силовой и СВЧ электроники по данным технологиям отсутствует.

Учитывая сказанное выше, а также тот факт, что использование ЭКБ на GaN позволяет создавать конечную продукцию с улучшенными техническими и функциональными параметрами, АО «ЗНТЦ» было принято решение о развитии данного направления совместно с НИУ МИЭТ. Технологический подход АО «ЗНТЦ» к освоению линейки изделий на основе нитрид-галлиевых транзисторов (GaN Si) является достаточно универсальным и позволяет выпускать СВЧ- и силовые HEMT-транзисторы, что, в свою очередь, позволит производить широкую номенклатуру изделий для силовой электроники, систем связи, а также электронной компонентной базы для автомобильной электроники нового поколения. В частности, изготовление силовых транзисторов по нитрид-галлиевым технологиям (GaN (Si)) позволит создавать перспективную электронную компонентную базу для быстродействующих силовых транзисторов. Изготовление СВЧ-транзисторов на основе нитрид-галлиевых технологий (GaN Si) позволит создавать на площадке АО «ЗНТЦ» перспективную электронную компонентную базу для СВЧ электроники широкого диапазона частот: L, X, K (от 2 до 27 ГГц), Ka, V (от 27 до 74 ГГц), а также приемо-передающих модулей для систем связи. В настоящее время получены образцы электроники на GaN:

- HEMT- и MISHEMT-транзисторы с Т-затвором <0,1 мкм, пробивное напряжение >250 В, выходные мощности от 10 Вт/мм (150 Вт для усилителя);
- функциональный ряд ЭКБ и приемо-передающих модулей со следующими характеристиками: рабочая частота до 50 ГГц, габаритные размеры не более 4×4×12 мм, выходная мощность 1–2 Вт.

Постановка технологии создания приборов на основе нитрида галлия на кремнии открывает путь к разработке различных систем гражданского назначения, это приемо-передающие модули микро- и макросот систем связи 5G, источники питания, силовые ключи управления электрическими двигателями и зарядными станциями для электромобилей и др. Ключевыми сферами применения разрабатываемой АО «ЗНТЦ» микроэлектронной продукции на GaN являются: промышленная электроника, телекоммуникационное оборудование, автоэлектроника, вычислительная техника.

***Литература***

1. «СВЧ Электроника»: официальный сайт. URL: https://microwave-e.ru/components/komponenty-wolfspeed.
2. «Терра Электроника»: официальный сайт. URL: https://www.terraelectronica.ru/news/5471.
3. Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices. Issue 2 (245). 2017.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.408.410

# Организация производства высоконадежных изделий твердотельной СВЧ ЭКБ: процедуры и первый опыт

## Setting up a Highly Reliable Solid State Microwave Components Production — Routines and First Experience

**Филаретов А. Г., к. ф.-м. н., Чалый В. П., к. ф.-м. н., Шуков И. В., Дудин А. Л., Фазылханов О. Р., Красовицкий Д. М., к. х. н.**
*АО «Светлана-Рост»*
*194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27*
*info@svrost.ru*

**Filaretov A. G., Ph.D, Chaly V. P., Ph.D, Shukov I. V., Dudin A. L., Fazylhanov O. R., Krasovitsky D. M., Ph.D**
*"Svetlana-Rost" JSC*
*27 Engels Ave., St. Petersburg, 194156, Russia*
*info@svrost.ru*

В докладе рассмотрены ключевые аспекты обеспечения надежности твердотельной электронной компонентной базы на стадии ее разработки и производства. Показано, что применение современных концепций, методов и средств испытаний позволяет вывести отечественные компоненты на конкурентоспособный уровень.
**Ключевые слова:** электронная компонентная база; надежность; безотказность; СВЧ-транзистор; нитрид галлия.

The paper considers key issues involved in setting up a highly reliable and competitive solid state microwave components production in Russia. Due to focusing on technology defined reliability aspects and applying some accelerated testing routines to technology development, parameters of GaN based power microwave transistors have been essentially improved.
**Keywords:** microwave solid state electron devices; reliability; failure analysis; microwave transistor; gallium nitride.

Постановка задачи организации производства высоконадежных изделий твердотельной СВЧ ЭКБ требует прежде всего детального определения самого термина «надежность». Одно из основополагающих слагаемых надежности — радиационная стойкость — компетентно рассмотрено в докладе наших коллег из Центра экстремальной прикладной электроники (ЦЭПЭ) МИФИ и АО «ЭНПО «СПЭЛС». Предмет настоящего доклада ограничим аспектом обеспечения безотказности твердотельной СВЧ ЭКБ при ее проектировании и производстве. Под «высоконадежной» мы будем понимать ЭКБ, одновременно обладающую двумя основными признаками:

- безотказностью в прямом смысле, т. е. способностью сохранять заданные значения параметров изделия на заданном промежутке времени;
- невозможностью попадания к потребителю изделий с дефектами, приводящими к ранним отказам, гарантированной производителем

и предотвращаемой при помощи особой организации процесса проектирования и производства.

В докладе критически проанализированы применяемые в РФ подходы к испытаниям надежности твердотельной СВЧ ЭКБ. В них соответствие требованиям безотказности проверяется в ходе множества испытаний, которым подвергаются выборки изделий из опытных или производственных партий. При этом для каждого нового изделия, даже создаваемого на основе конструктивно-технологических аналогов, требуется повторять весь комплекс испытаний на безотказность. Это является прямым следствием принятых нашей системой разработки постулатов:

- безотказность является исключительно атрибутом изделия;
- изделие является единственным объектом стандартизации.

Задачу предотвращения ранних отказов у потребителей призвана решить процедура так называемого выжигания дефектов (электротермотренировка, по ГОСТ Р 53711-2009). А основной задачей испытаний на безотказность является проверка того, что интенсивность отказов изделия не превосходит заданного значения. Обычно эти испытания проводятся при фиксированном (по группе применения) наборе условий эксплуатации и поэтому не могут дать разработчику аппаратуры возможности прогнозирования параметров ее безотказности в иных условиях.

Основное отличие принятой в мировой полупроводниковой индустрии парадигмы обеспечения надежности заключается в определении технологии как самостоятельного объекта стандартизации и одновременно в выделении двух основных компонент понятия «безотказность». Безотказность (как и надежность в целом) трактуется как аддитивное свойство, определяемое как технологией изготовления изделия, так и его конструкцией.

Методы и подходы в такой парадигме сконцентрированы на идентификации и обеспечении безотказности стандартных элементов библиотек, на основе которых разрабатываются и производятся конструктивно-технологически подобные изделия твердотельной СВЧ ЭКБ. В результате параметры надежности проектируемого изделия могут быть не только предсказаны при его проектировании, но и оптимизированы исходя из области назначения и условий эксплуатации в аппаратуре. Кроме того, идеология контроля качества стандартных технологических процессов способна исключить дополнительную процедуру электротермотренировки и, тем самым, сократить длительность производственного цикла и себестоимость изделий.

Эффект применения описанного «двухкомпонентного» подхода к безотказности объекта разработки продемонстрирован на примере разработанной в АО «Светлана — Рост» технологии изготовления мощных СВЧ AlGaN-транзисторов. В докладе показана динамика повышения срока их службы без деградации выходной мощности по мере оптимизации технологии изготовления, детально рассмотрена структурная схема испытательного стенда и описан его действующий макет. Обсуждены отличия в процедурах испытаний на безотказность СВЧ-транзисторов с двумерным каналом в системах на основе арсенида и нитрида галлия, проанализированы требования к проведению испытаний твердотельной СВЧ ЭКБ, установленные в стандартах США. Также обсужден математический аппарат прогнозирования параметров безотказности изделий твердотельной СВЧ ЭКБ на стадии их проектирования.

While setting the task of highly reliable solid state microwave components production it is extremely important to understand the term "reliability" actual meaning. Radiation hardness, as one of the main constituents of reliability, is observed in details in the report of our colleagues from Moscow's Extreme Applied Electronics Center of MEPhI and "ENPO SPELS" JSC. This report is dedicated to failure-free operation of solid state microwave components provided by its development and production methodology. Here, "highly reliable" means that the component or device demonstrates simultaneously:

- failure-free operation as ability to keep the given parameter values during the given term;
- preventing of shipping to Customer those components or devices that possess defects leading to early failure guaranteed by the design and technology quality management.

First, traditional approach to solid state components' reliability testing regulated by Russian State Standards is critically analyzed. It involves multiple workout tests performed on samples extracted from every batch of devices, repeated every time on every batch. Every newly developed device, even if having been designed on the base of constructive and technological analogues, should be tested by the same full routines program. Such a situation has appeared due to two main initial postulates:

- failure (and failure free operation) is concerned (attributed) to component or device only;
- product (component or device) is the only object of standardization.

To avoid early failures at Customer's side, so called "defects burning out" standardized procedure is routinely used by manufacturers. As for failure free operation tests, the main goal usually is to check that the failure rate doesn't exceed the given set value. Such a testing is performed at fixed set of regimes regulated by standard application conditions, so their results are hardly applicable for prognosis of device reliability at other, arbitrary conditions.

In contrast, the main postulates of the reliability paradigm accepted and successfully used in world's semiconductor industry include the technology as the independent standardization object and, as a consequence, extraction of two main contributions to failure nature. Thus, failure free operation (and reliability as a whole) is uderstood as an additive attribute of a component or device, defined by its production technology as well as its design.

In such a paradigm, practical approaches and test methods are concentrated on characterization and provision of failure free operation of the elementary cells within standard libraries (building blocks) used to design and manufacture of solid state microwave components featuring similarity in design and technology simultaneously. As a result, reliability parameters of the component would be predicted at early design stages and optimized for specific application conditions. Besides, standard technologies quality management ideology as a whole allows one to exclude an additional "burning out" routines, to shorten the duration of production cycle and thus to reduce cost.

This "additive reliability" approach was effectively used by "Svetlana-Rost" JSC during the research and development of the AlGaN-based high power microwave transistors technology. Here, we report the dynamics of failure (detected by output power degradation) free operation term increase while optimizing technology. We also consider the detailed scheme of testing equipment and describe its operating model. The differences in failure testing procedures for microwave transistors based on GaN and GaAs have been pointed out; the reliability requirements of JEDEC standards have been analyzed as well. The statistical and math models for reliability parameters prognosis during the solid state microwave components design have also been discussed.

УДК 530.145 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.411.412

# Опыт разработки монолитных интегральных схем на основе нитридных гетероструктур

## Experience in the Development of Monolithic Integrated Schemes Based on Nitride Heterostructures

**Иванова Н. Е., Гнатюк Д. Л., Матвеенко О. С.**
*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой микроэлектроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)*
*117105, г. Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5*
*natalia.ivanova.mipt@gmail.com*

**Ivanova N. Ye., Gnatyuk D. L., Matveyenko O. S.**
*V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences*
*bld. 5, 7 Nagorny Lane, Moscow, 117105, Russia*
*natalia.ivanova.mipt@gmail.com*

Представлены технологические возможности и опыт проектирования и изготовления СВЧ монолитных интегральных схем диапазона частот до 100 ГГц на основе нитридных гетеростуктур.
**Ключевые слова:** монолитные интегральные схемы; гетероструктура GaN; сантиметровый и миллиметровый диапазон длин волн.

ИСВЧПЭ РАН занимается разработкой и изготовлением СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на материалах $A^3B^5$. Специалисты института начинали работу на базе гетероструктур GaAs. Гетероэпитаксиальный рост на подложках GaAs выполнялся на собственном технологическом участке. На гетероструктурах GaAs были получены метаморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов с предельной частотой усиления по мощности Fmax более 600 ГГц. Помимо этого, был изготовлен ряд малошумящих усилителей и усилителей мощности диапазона частот до 40 ГГц.

На протяжении последних десяти лет ИСВЧПЭ РАН занимается разработкой и изготовлением СВЧ МИС на основе гетероструктур GaN. Институт работает с коммерчески доступными подложками с уже выращенной на них нитридной гетероструктурой. Среди разработок института имеются МИС различного функционального назначения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн (табл. 1).

**Таблица 1**

| СВЧ МИС | Частотный диапазон | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | L/S | X | K/Ka | V | W |
| Малошумящий усилитель | + | + | + | + | + |
| Усилитель мощности | + | + | + | + | + |
| Генератор, управляемый напряжением | | | + | + | |
| Смеситель | | | + | + | |
| Система на кристалле | | | + | + | |

Изготовление СВЧ МИС осуществляется по базовой технологии, исходными структурами для которой являются любые типы гетероструктур на основе нитридов элементов третьей группы с квазидвумерным электронным газом (HEMT-структуры), выращенные на подложках сапфира, карбида кремния или кремния.

Базовым активным элементом является секционированный полевой транзистор с барьером Шоттки и шириной грибообразного затвора не более n*(20–100 мкм), где n = 2–6 в базовом варианте.

Базовая технология обеспечивает для транзисторов предельную частоту усиления по току Ft = 70 ГГц и предельную частоту усиления по мощности Fmax >100 ГГц при базовой длине затвора ~0,15 мкм, расстоянии исток-сток 4 мкм, удельном контактном сопротивлении 0,3 Ом·мм ширины затвора.

Технологическая линейка оборудования относится к классу R&D. Эпитаксиальное доращивание контактного слоя GaN для формирования невжигаемых омических контактов выполняется за стенами нашего института.

Парк контрольно-измерительного оборудования позволяет выполнять измерения основных характеристик МИС в диапазоне частот до 67 ГГц непосредственно на рабочих пластинах зондовым способом.

Для проектирования СВЧ МИС используются современные средства САПР известных мировых брендов.

Из последних разработок можно выделить многофункциональные МИС типа «система на кристалле» для диапазонов частот 20 и 60 ГГц, позволяющие реализовать функции приема и передачи СВЧ-сигнала для решения задач радиолокации и связи. Для диапазона 60 ГГц реализован вариант МИС со встроенными в кристалл приемной и передающей антеннами в герметичном корпусе из низкотемпературной керамики размером 7×7 мм.

В сотрудничестве с партнерами ведутся исследования по монтажу кристаллов см- и мм-диапазонов длин волн в корпуса и оснастки с применением методов прямого и обратного монтажа.

Ряд разработанных СВЧ МИС прошли необходимые испытания и включены в серию 5411 (приложение к перечню ЭКБ).

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.413.414

# Автоматизация проектирования блоков для построения СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе отечественной 0,25-мкм GaAs pHEMT-технологии

## Automation of Blocks Design for Developing of SHF Microwave Multifunctional Integrated Chips Based on Domestic 0.25 Microns GaAs pHEMT Technology

**Сальников А. С., Горяинов А. Е., Билевич Д. В., Метель А. А., Файль Т. Н., Новичкова Ю. А., Попов А. А., Калентьев А. А., Добуш И. М.**
*ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», лаборатория «50ohm Lab»*
*634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147, оф. 209*
*info@50ohm.tech*

**Sal'nikov A. S., Goryainov A. Ye., Bilevich D. V., Metel' A. A., Fayl' T. N., Novichkova Yu. A., Popov A. A., Kalent'yev A. A., Dobush I. M.**

Приведены результаты разработки методик и алгоритмов, позволяющих выполнить автоматизированное проектирование усилительных и логических схем, используемых при построении СВЧ многофункциональных интегральных схем. Исследования проводились на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT-технологии (АО «Светлана-Рост»).

**Ключевые слова:** СВЧ многофункциональная интегральная схема; функциональный блок; библиотека элементов; автоматизированное проектирование; синтез схемных решений.

СВЧ многофункциональные интегральные схемы (СВЧ МФИС) включают в свой состав два и более различных функциональных блока (ФБ). К основным ФБ СВЧ МФИС относятся: усилительные (МШУ, БУ, УМ), управляющие (ступенчатые аттенюаторы и фазовращатели, коммутаторы), логические (параллельные и последовательные драйверы управления).

В целях повышения эффективности разработки СВЧ МФИС в данной работе предложены методики и алгоритмы автоматизированного проектирования (синтеза) схемных решений усилительных и логических ФБ. В качестве поискового алгоритма для синтеза схемных решений ФБ используется подход на основе эволюционных вычислений. Особенностью предложенных методик является использование моделей элементов для выбранной технологии изготовления СВЧ ИС, что позволяет непосредственно в процессе синтеза получать схемные решения, пригодные для реализации в заданном технологическом процессе.

В случае усилительных ФБ основное внимание уделяется автоматизированному проектированию схемных решений СВЧ-усилителей с распределенным усилением (УРУ). УРУ являются одним из основных типов схемотехнических решений, используемых при построении сверхширокополосных СВЧ-усилителей различного динамического диапазона (МШУ, БУ, УМ) [1]. В результате работы предложены методика, алгоритм и прототип программного модуля для автоматизированного проектирования СВЧ УРУ по комплексу требований к его линейным

характеристикам (коэффициент усиления, коэффициенты отражения по входу и выходу, инвариантный коэффициент устойчивости). Для математического описания СВЧ УРУ используется метод на основе соединения восьмиполюсников, обладающий высоким быстродействием при решении многоитерационных задач синтеза. Работа методики автоматизированного проектирования СВЧ УРУ продемонстрирована на примере разработки каскада предварительного усиления для буферного усилителя диапазона частот 20–30 ГГц.

Решение задачи автоматизации проектирования логических ФБ сводится к синтезу схемных решений трех составных блоков, имеющих наибольшую вариативность: инвертора, входного и выходного преобразователя напряжений. Для каждого из составных блоков использовался уникальный набор критериев оценки синтезируемых решений: а) инвертор — напряжение логической единицы на выходе инвертора, статическая потребляемая мощность, запас помехоустойчивости для логических единицы и нуля, разница между напряжением логической единицы на постоянном и переменном токе, разница между напряжением логического нуля на постоянном и переменном токе; б) входной преобразователь напряжения — значения выходных напряжений при логических единице и нуле на входе, значение входного напряжения переключения инвертора, максимальный ток потребления; в) выходной преобразователь напряжения — значение выходных напряжений при логических единице и нуле на входе, максимальная потребляемая мощность. Перечисленные блоки предназначены для построения последовательно-параллельного драйвера управления СВЧ МФИС [2].

Исследования проводились на примере библиотеки стандартных элементов для технологического процесса 0,25 мкм GaAs pHEMT (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург).

***Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).***

***Литература***

1. Добуш И. М., Калентьев А. А., Метель А. А., Горяинов А. Е. Морфологический анализ интегральных СВЧ-усилителей с распределенным усилением // Вопросы радиоэлектроники, 2020. — 49 (6). — С. 40–46.
2. Билевич Д. В. Обзор цифровых драйверов управления СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе GaAs-технологии // Электронная техника. Серия 1, «СВЧ-техника». 2021.

УДК 621.37 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.415.417

# Высокочастотная модель катушки индуктивности

## High Frequency Equivalent Circuit Inductor Model

**Дмитриков В. Ф.[1], д. т. н., Исаев В. М.[2], д. т. н., Куневич А. В.[3], к. ф.-м. н., Шушпанов Д. В.[4], к. т. н., Петроченко А. Ю.[5]**

*[1] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*
*193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, корп. 1*
*dmitrikov_vf@mail.ru*
*[2] АО «Российская электроника»*
*121357, г. Москва, ул. Верейская, 29, стр. 141*
*[3] ООО «СЗЛ»*
*196128, г. Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 5А*
*[4] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*
*193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, корп. 1*
*dimasf@inbox.ru*
*[5] АО «Концерн «НПО «Аврора»*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15*

**Dmitrikov V. F., Isaev V. M., Kunevich A. V., Shushpanov D. V., Petrochenko A. Y.**

По измеренным частотным характеристикам сопротивлений дросселей, намотанных на различных ферритовых сердечниках и с разным количеством витков была построена эквивалентная схема замещения в широком диапазоне частот (0 Гц — 500 МГц). Данная схема замещения была построена с учетом физических процессов, протекающих в дросселе.
**Ключевые слова:** дроссель; схема замещения; комплексное сопротивление; комплексная магнитная проницаемость.

Based on the measured impedance of the inductors wound on various ferrite cores and with a different number of turns, an equivalent high frequency (0 Hz — 500 MHz) circuit model was built. The equivalent circuit model was built taking into account the physical processes occurring in the inductor.
**Keywords:** inductor; equivalent circuit; ferrite; impedance; complex permeability.

В настоящее время в современных импульсных источниках электропитания, используемых в авиационно-космических системах и для питания приемо-передающих модулей (ППМ) активных фазированных решетках (АФАР) современных РЛС, для улучшения их удельных массогабаритных характеристик в пределах 10 кВт / дм$^3$ происходит преобразование энергии на частотах сотни кГц — единицы МГц.

Переключение силовых полупроводниковых приборов в источниках вторичного электропитания (ИВЭП) является основным источником электромагнитных помех (ЭМП). Чтобы соответствовать стандартам электромагнитной совместимости (ЭМС) необходимо снизить уровень кондуктивных помех. Это снижение может быть достигнуто различными методами, включая фильтры радиопомех (ФРП),

технология изготовления которых в основном основана на использовании катушек индуктивностей (дросселей) и конденсаторов. Дроссели и конденсаторы являются ключевыми элементами при разработке ФРП и требуют знания их точных высокочастотных моделей до 100 МГц и выше.

Статья посвящена разработке ВЧ модели дросселей на основе электрических эквивалентных схем замещения дросселя, учитывающих влияние сопротивление провода, частотные характеристики вещественной и мнимой составляющей комплексной магнитной проницаемости сердечника дросселя, эффекты длинных линий проводов обмотки дросселя, взаимодействия магнитных потоков сердечника и проводов обмотки.

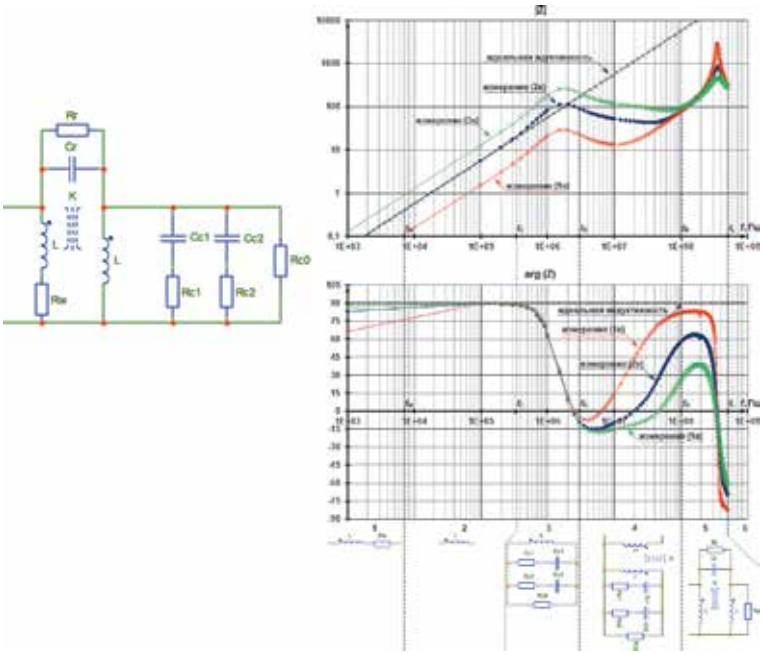



**Рис. 1.** Схема замещения дросселя и измеренные частотные характеристики комплексного сопротивления дросселя (сердечник N87) с различным количеством витков n: 1, 2, 3 и разбивкой на области работы схемы замещения

Такой подход в построении моделей дросселя с учетом различных физических механизмов и процессов позволяет объяснить почему частотные характеристики (модуль и фаза) комплексного сопротивления (импеданса) дросселя так ведут себя в широкой полосе частот (до 500 МГц). Это позволит лучше понять физические процессы, протекающие в дросселе, а также позволит понять, как улучшить частотные характеристики дросселя и построить РЭА с лучшими характеристиками.

В качестве материала был выбран феррит из-за его наиболее частого использования в силовой электронике. Чтобы избежать проектирование ФРП методом проб

и ошибок, разработка высокоточных ВЧ моделей дросселей является важной и актуальной проблемой и сокращает процесс проектирования и оптимизации ФРП и РЭА. Тем не менее, схемы замещения дросселей при разработке их моделей (электрических эквивалентных схем) в широком диапазоне частот остаются сложными.

На рис. 1 приведены частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления дросселя (сердечник — феррит N87) с различным количеством витков обмотки. Из рис. 1 и проведенных расчетов можно сделать вывод, что реальный дроссель представляет идеальную индуктивность в достаточно узком диапазоне частот: 7–300 кГц для феррита N87 и 1–30 кГц для феррита T38. Этот диапазон частот зависит от комплексной частотной характеристики вещественной и мнимой частей магнитной проницаемости сердечника, а также количества витков и параметров провода. Это соответствует участку «2» на рис. 1 по частотной фазовой характеристике, когда фаза близка 90°. Схема замещения дросселя, учитывающая влияние магнитной проницаемости сердечника, соответствующая 3-му интервалу частот, представляет собой параллельный колебательный контур.

Определены границы характерных частотных интервалов и описаны механизмы и процессы, определяющие характер частотных характеристик модулей и фаз сопротивления дросселя:

- влияния комплексной магнитной проницаемости (интервал 3);
- взаимодействие магнитных полей сердечника и провода дросселя (интервал 4);
- влияние проходной емкости в системе взаимодействия магнитных полей сердечника и дросселя (интервал 5).

***Литература***

1. Dmitrikov V. F., Frid L. E., Belyaev A. E., Petrochenko A. Y., Zaytseva Z. V. Synthesis of Equivalent Circuits for Chokes and Capacitors in a Wide Range of Frequencies Taking into Account Dynamic Processes in Dielectric and Magnetic Materials // 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2019. Novosibirsk State Technical University, IEEE Russia Siberia Section. 2019. P. 532–540.
2. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Эквивалентная схема замещения реального дросселя в широком диапазоне частот // IV Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2020. «Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2020». Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, 2020. — С. 262–263.
3. Cuellar C., Idir N., Benabou A. High Frequency Behavioral Ring Core Inductor Model // IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 31. Issue 5, May 2016. P. 3763–3772.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.418.419

# Программный модуль для сопряжения инструментов синтеза схемных решений СВЧ интегральных схем с закрытыми библиотеками элементов в САПР электронных устройств

## Software Module for the Interfacing of Tools for a Synthesis of Circuit Solutions of SHF Integrated Chips with CAE Electronic Devices and Closed Elements Libraries

**Калентьев А. А., Новичкова Ю. А., Файль Т. Н., Горяинов А. Е., Добуш И. М.**
*ООО «50ом Технолоджиз»*
*634045, г. Томск, ул. Нефтяная, 11, к. 238*
*info@50ohm.tech*

**Kalent'yev A. A., Novichkova Yu. A., Fayl T. N., Goryainov A. Ye., Dobush I. M.**

Предложен подход к сопряжению разрабатываемых инструментов синтеза СВЧ ИС с закрытыми библиотеками элементов фаундри-компании. Подход реализован в виде программного модуля, что обеспечивает возможность эффективной интеграции инструментов синтеза в традиционный процесс проектирования СВЧ ИС в САПР.

**Ключевые слова:** СВЧ интегральная схема; библиотека элементов; САПР электронных устройств; синтез схемных решений.

Сокращение времени и стоимости разработки СВЧ интегральных схем (ИС) определяет тенденцию развития программных модулей для автоматизированного синтеза схемных и топологических решений. Особый интерес представляют инструменты синтеза, позволяющие сгенерировать набор решений по комплексу требований к характеристикам СВЧ ИС с учетом особенностей выбранной технологии изготовления [1]. Для повышения эффективности практического использования разрабатываемых инструментов синтеза необходимо обеспечить их интеграцию в традиционный процесс проектирования СВЧ ИС.

Основой организации работ для традиционного процесса проектирования СВЧ ИС [2] является модель бизнес-процессов «фаблесс — фаундри». Связующим звеном между фаблесс- и фаундри-компаниями является библиотека элементов (PDK — Process Design Kit). Библиотека элементов — это программное дополнение к САПР электронных устройств, включающее всю необходимую для проектирования СВЧ ИС информацию о выбранной технологии изготовления, в том числе электрические модели элементов, топологические ячейки, параметры материалов, справочную информацию и др. Наличие у проектировщика фаблесс-компании специализированной САПР и совместимой с ней библиотеки элементов позволяет ему разработать ИС с учетом особенностей конкретной технологии изготовления фаундри-компании. Необходимо отметить, что библиотеки элементов коммерческих фаундри-компаний являются закрытыми, то есть информация о типах, структурах и внутренних параметрах моделей элементов является ноу-хау каждой фаундри-компании.

Таким образом, постановку задачи в этой работе можно сформулировать следующим образом: предложить подход к сопряжению разрабатываемых инструментов

синтеза с закрытыми библиотеками элементов фаундри-компании, совместимых с САПР электронных устройств, для обеспечения их эффективной интеграции в традиционный процесс проектирования СВЧ ИС.

Предложенный подход основан на использовании табличных моделей СВЧ-элементов. К основным критериям выбора данного типа моделей относятся: а) универсальность подхода для любого элемента и любой библиотеки элементов, которые поддерживаются конкретной САПР; б) соответствие результатов моделирования характеристик синтезируемого и смоделированного в САПР схемного решения.

На основе представленного подхода был разработан программный модуль, позволяющий выполнить следующее:

1) сделать «дубликат» библиотеки элементов на основе закрытой библиотеки элементов СВЧ ИС;
2) использовать дубликат библиотеки для синтеза схемных решений СВЧ ИС с учетом особенностей конкретного технологического процесса;
3) обеспечить обратную совместимость синтезированного решения на основе моделей дубликата библиотеки с закрытой библиотекой элементов в САПР. Другими словами, провести экспорт схемного решения из инструментов синтеза в САПР электронных устройств на основе библиотеки элементов заданной фаундри-компании.

Для экспериментальных исследований использовалась библиотека элементов для технологического процесса 0,25 мкм GaAs pHEMT (АО «Светлана-Рост») и САПР AWR Design Environment (Cadence).

***Литература***

1. Метель А. А., Файль Т. Н., Новичкова Ю. А., Добуш И. М., Горяинов А. Е., Калентьев А. А. Автоматизированное проектирование линейных интегральных СВЧ-усилителей с распределенным усилением // Вопросы радиоэлектроники, 2021. — № 3. — С. 40–48.
2. Robertson I. D., Lucyszyn S. RFIC and MMIC Design and Technology // The Institution of Engineering and Technology, 2009. P. 582.

УДК 621.385.642.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.420.422

# Особенности работы комплекса «безнакальный магнетрон — модулятор»

## Features of the Work of the Complex “Channelless Magnetron — Modulator”

**Мельников В. А., д. т. н.**
***генеральный директор***
*АО «Плутон»*
*105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, 11*
*ceo@pluton.msk.ru*

**Mel’nikov V. A., Sc.D**

Рассмотрена работа безнакальных магнетронов в комплексе со схемами импульсных модуляторов с импульсным трансформатором и твердотельными ключами. Приведена оценка работы комплекса на электрические характеристики магнетрона с «холодным» катодом.

**Ключевые слова:** радиолокационная система; безнакальный магнетрон; импульсный трансформатор; вискер; объемно-пространственный заряд; модулирующий импульс; твердотельный ключ.

В настоящее время требования к информативности радиолокационных систем (РЛС) стремительно растут. Актуальной задачей является использование для передатчиков простых РЛС на основе сравнительно дешевых безнакальных магнетронов со сроком службы более 10000 часов.

В схемах импульсных модуляторов магнетронных передатчиков используется хорошо зарекомендовавшая себя схема с частичным разрядом накопительной емкости и импульсным трансформатором (ИТ) (рис. 1), основным недостатком которой является искажение формы модулирующего импульса.

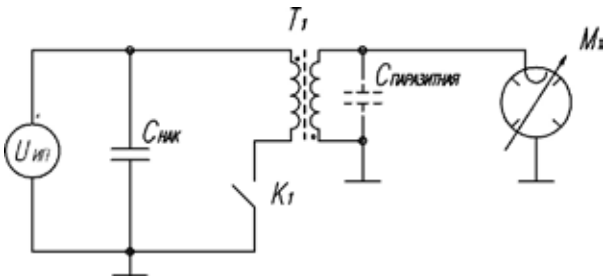



**Рис. 1.** Схема модулятора с частичным разрядом накопительной емкости и ИТ

Работа безнакальных магнетронов принципиально отличается от накаливаемых магнетронов.

Типовые эпюры импульсов модулирующего напряжения, тока безнакального магнетрона и огибающей ВЧ-импульса для схем на рис. 1 приведены на рис. 2 и 3.

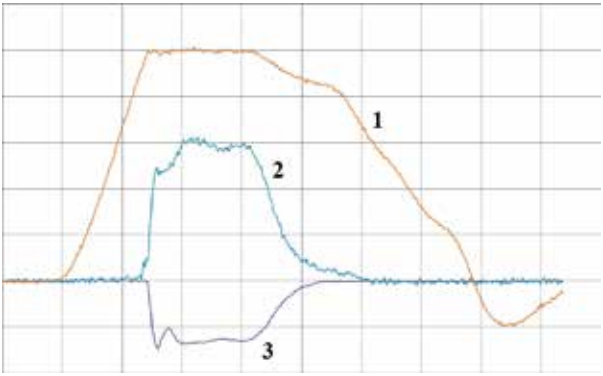



**Рис. 2.** Эпюры импульсов: 1) модулирующего напряжения; 2) тока магнетрона (за вычетом тока паразитной емкости магнетрона); 3) огибающей ВЧ-импульса

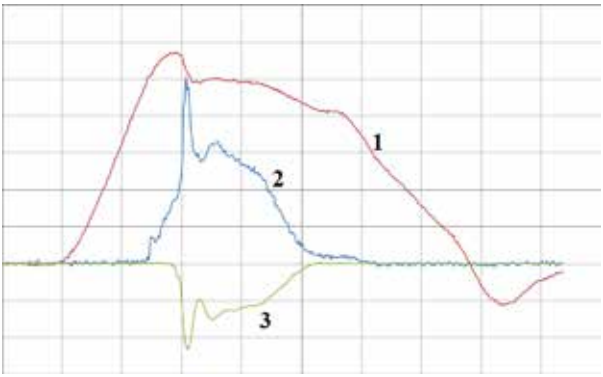



**Рис. 3.** Эпюры импульсов при появлении флюктуации ВЧ-огибающей

В момент замыкания коммутатора (К1) через первичную обмотку ИТ начинает протекать ток. Напряжение на выходе ИТ увеличивается, активный ток через магнетрон отсутствует [1], его активное сопротивление стремится к бесконечности, ИТ нагружен на несогласованную нагрузку. При достижении напряжением номинального значения ток магнетрона резко возрастает — ИТ переходит в согласованный режим работы (рис. 2). При наличии флюктуаций фронта ВЧ-импульса ИТ не переходит в режим согласования, сопротивление магнетрона остается повышенным относительно номинала, в результате [2] появляются броски напряжения (рис. 3), что приводит к перегреву катода, возбуждению паразитных видов колебаний и т. д.

После окончания импульса ключ (К1) размыкается. Протекание тока через магнетрон прекращается не мгновенно. На спаде импульса напряжения и тока появляется характерный «пьедестал» (рис. 2 и 3). Продолжительное воздействие

электрического поля, не предусмотренное режимом работы безнакального магнетрона, приводит к повышению температуры поверхности АЭК.

В целях устранения возможности появления бросков напряжения следует вводить в схему ограничители напряжения и цепи формирования фронта импульса [3]. В современных радиопередающих устройствах целесообразно использование схем модуляторов без использования импульсных трансформаторов, например схемы, приведенной на рис. 4.

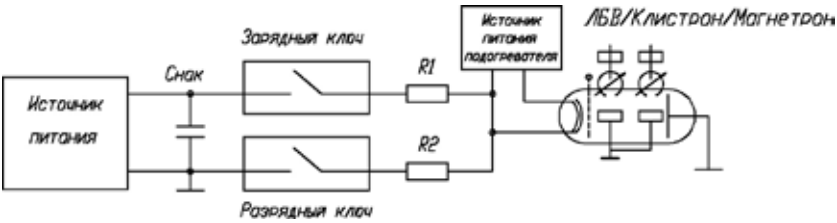



**Рис. 4.** Схема системы импульсного электрического питания ЭВП СВЧ

В такой схеме происходит накопление электрической энергии при полном напряжении ЭВП СВЧ, накопительная емкость во время импульса подключается к нагрузке высоковольтным ключом (зарядный ключ). В паузах между импульсами нагрузка шунтируется другим ключом (разрядным). В качестве коммутирующих элементов возможно использование составных твердотельных ключей [4]. На рис. 5 приведены эпюры импульсов модулирующего напряжения и ВЧ-огибающей, формируемые такими модуляторами.

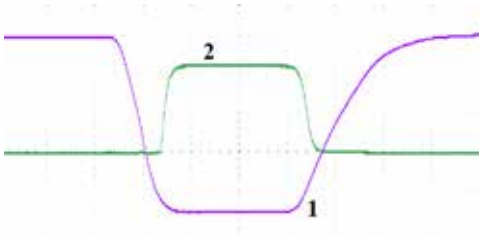



**Рис. 5.** Эпюры импульсов: 1) модулирующего напряжения; 2) ВЧ-огибающей

***Литература***

1. Бычков С. И. Магнетронные передатчики. — М.: Военное издательство, 1955.
2. Ицхоки Я. С. Импульсные трансформаторы (Теория, расчет, конструкция и испытание). — М.: Бюро новой техники, 1950. — 742 с.
3. Евтянов С. И. Радиопередающие устройства. — М.: Связьиздат, 1950.
4. Казанцев В. И., Алексеев В. А., Сергеев В. Г., Хижняков П. М. Радиопередающие системы для мощных импульсных РЛС // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. — Спецвыпуск № 2, 2009.

УДК 621.396.69 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.423.425

# Анализ состояния разработки ИМС ГУН в диапазоне частот от 2 до 28 ГГц

## MMIC VCO 2–28 GHz Frequency Range Design Status Review

**Зайцев А. А.**[1]
***Начальник научного отделения № 8***

**Вагин А. В.**[1]
***Начальник отдела***

**Баландин Д. А.**[1]
***Начальник лаборатории***

**Кузьмин А. Д.**[1]
***Инженер 2-й категории***

**Сурков Н. С.**[1,2]
***Инженер 2-й категории, аспирант***
*Nikita.surckov2016@yandex.ru*

[1] *АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*
[2] *Физико-технологический институт РТУ МИРЭА*
*119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78*

**Zaycev A. A.**[1]
***Head of Scientific Department Number 8***

**Vagin A. V.**[1]
***Department Head***

**Balandin D. A.**[1]
***Head of laboratory***

**Kuzmin A. D.**[1]
***Engineer of the 2nd category***

**Surkov N. S.**[1,2]
***Engineer of the 2nd category, postgraduate student***
*Nikita.surckov2016@yandex.ru*

[1] *"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*
[2] *Physico-technological Institute of MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

Данная работа посвящена анализу состояния разработки интегральных монолитных схем генераторов, управляемых напряжением в современном мире. В статье описаны особенности параметров, представлены варианты исполнения МИС ГУН каждого производителя, также определен максимально востребованный диапазон частот.

**Ключевые слова:** монолитная интегральная схема; широкополосный двухтактный генератор, управляемый напряжением; ФАПЧ; фазовый шум; GaAs ГБТ; СВЧ; МИС.

This work is focused on mmic vco design level status in the modern world. The article describes parameter features, presents various versions of products from each manufacturer, as well as defines the most acclaimed frequency range.
**Keywords:** monolithic integrated circuit; wideband; push-push; voltage controlled oscillator; PLL; phase noise; GaAs HBT; microwave; MMIC.

Интегральные микросхемы генераторов, управляемых напряжением (ГУН), являются неотъемлемым компонентом при построении компактных синтезаторов частот (СЧ) с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), которые, в свою очередь, широко применяются в современном мире: в системах радиолокационного обнаружения целей, в системах связи, в том числе и 5G, в гетеродинах приемных устройств и измерительных приборах.

К основным параметрам и характеристикам ГУН относятся: напряжение питания, ток потребления, диапазон рабочих частот, коэффициент перекрытия частот, выходная мощность, неравномерность выходной мощности, уровень спектральной плотности мощности фазового шума (СПМ ФШ) на разных отстройках, наличие в схеме буферных усилителей (БУ) и делителей частоты (ДЧ), а также габаритные размеры.

Применение ГУН в монолитном исполнении позволяет получить наименьшие массогабаритные показатели в конечной радиоэлектронной аппаратуре.

Основными технологическими процессами для реализации интегральных микросхем ГУН являются GaAs и SiGe. В свою очередь, наиболее распространенным для изготовления таких монолитных схем является GaAs ГБТ, так как обеспечивает наиболее оптимальные показатели уровня СПМ ФШ и рабочего диапазона конечного изделия ГУН.

Целью данной работы является оценка современного технического уровня изделий монолитных интегральных схем генераторов, управляемых напряжением.

В работе представлен анализ зарубежного рынка производителей ИМС ГУН. Выделены три3 основных производителя: Analog Devices, Qorvo и MACOM. Рабочие частоты импортных изделий лежат в сантиметровом диапазоне от 2 до 28 ГГц: Analog Devices — от 1,94 до 28 ГГц, Qorvo — от 3,8 до 19,55 ГГц, MACOM — от 5,2 до 15,25 ГГц. Фирма Analog Devices производит 61 типономинал изделий ГУН, Qorvo — 34, а MACOM — 19.

В первой главе описаны типовые и исключительные варианты реализации всех микросхем ГУН мировых производителей. В основном образцы поставляются в малогабаритных пластмассовых корпусах QFN24 либо в QFN32. Также представлен график распределения рабочих частот всех изделий МИС ГУН в диапазоне от 2 до 28 ГГц.

Во второй главе проведен анализ особенностей и основных параметров изделий каждой компании. Анализ параметров, в котором участвовало 114 типономиналов импортных изделий, проводился по данным производителей. Конкретные числовые значения либо были указаны в явном виде, либо пересчитывались из графических зависимостей.

В третьей главе описано текущее состояние отечественного производства микросхем ГУН в сантиметровом диапазоне частот.

По результатам анализа зарубежного рынка генераторов, управляемых напряжением в виде интегральных микросхем, можно сделать вывод, что на диапазон от 5 до 15,5 ГГц приходится наибольшее число типономиналов изделий. Данный диапазон предназначен для радионавигации, радиолокации, спутниковой связи (космос — Земля, Земля — космос), морской и воздушной навигации, медицинского оборудования, оборонной промышленности, метеорологических служб, радиовещания, гидрологических станций, а также спутниковых служб исследования Земли.

Авторы считают, что данный анализ в полной мере раскрывает состояние технического уровня изделий ИМС ГУН.

***Литература***

1. Сурков Н. С., Баландин Д. А., Кузьмин А. Д., Юрасов А. Н. СВЧ МИС двухтактного генератора, управляемого напряжением диапазона частот 8–12 ГГц // Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА, Москва, 16–17 апреля 2020 года. — Москва: МИРЭА — Российский технологический университет, 2020. — С. 93–97.
2. Савченко Е. М., Будяков А. С., Баландин Д. А. Способы снижения уровня фазовых шумов СВЧ МИС генераторов, управляемых напряжением X-диапазона частот на основе GaAs гетеробиполярных транзисторов // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. — Москва: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2012. — С. 26–28.
3. Савченко Е. М., Будяков А. С., Баландин Д. А. СВЧ МИС генератора, управляемого напряжением X-диапазона частот на основе гетеробиполярного GaAs технологического процесса // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сборник научных трудов / Под ред. В. Я. Стенина. — Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. — С. 269–273.
4. https://www.analog.com/en/products/rf-microwave/vcos-plos.html.
5. https://www.macom.com.
6. https://www.qorvo.com.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.426.428

# Исследование и разработка квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот в диапазоне 50 МГц — 5 ГГц

## Research and Design of a 50 MHz — 5 GHz Quadrature Modulator with Integrated Frequency Synthesizer

**Калёнов А. Д.[1,2], Недашковский Л. В.[1,2], Шабардин Р. С.[1], к. т. н., Федичева Ю. Ю.[1], Ионов Л. П.[1], Мухин И. И.[1], к. т. н.**
*[1] АО «НИИМА «Прогресс»*
*125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54*
*kalenov@mri-progress.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Kalyonov A. D.[1,2], Nedashkovskiy L. V.[1,2], Shabardin R. S.[1], Ph.D, Fedicheva J. J.[1], Ionov L. P.[1], Mukhin I. I.[1], Ph.D**
*[1] Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC ("PROGRESS MRI" JSC)*
*54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

В работе представлены результаты проектирования МИС широкополосного квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот в диапазоне 50 МГц — 5 ГГц по технологии 180 нм БиКМОП SiGe. В предложенной архитектуре полоса сигнала модулятора регулируется в соответствии с выходной частотой синтезатора. По результатам моделирования коэффициент передачи — не менее 0 дБ, уровень фазовых шумов сигнала гетеродина на отстройке 1 МГц — не более минус 126 дБн/Гц, линейность по выходу — не менее 10 дБм, ток потребления — не более 290 мА.
**Ключевые слова:** ФАПЧ; SiGe; ГУН; ПФФ; делитель частоты; смеситель.

The paper presents the results of designing monolithic integrated circuit (MMIC) broadband quadrature modulator with a integrated frequency synthesizer in the range of 50 MHz-5 GHz using the 180 nm BiCMOS SiGe technology. In the proposed architecture, the signal band of the modulator is adjusted in accordance with the output frequency of the synthesizer. The simulation results show that the transmission coefficient is not less than 0 dB, the phase noise level of the local oscillator signal at the 1 MHz tuning is not more than minus 126 dBn/Hz, the linearity of the output is not less than 10 dBm, the consumption current is not more than 290 mA.
**Keywords:** PLL; SiGe; VCO; PFF; frequency divider; mixer.

В последние годы наблюдается быстрое развитие беспроводной связи, опубликовано множество статьей по теме синтезаторов и модуляторов. Однако распространение различных стандартов связи создало потребность в интегрированных системах на кристалле (СнК).

В данной работе рассмотрены схемотехнические решения для системы на кристалле с высокими техническими параметрами. Предложенная архитектура

представляет собой совмещение на одном кристалле синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты и квадратурного модулятора. В случае разделения синтезатора и модулятора на несколько кристаллов дополнительные размеры и вес снижают эффективность и повышают стоимость устройства. Объединение в систему на кристалле увеличивает шумы, влияние паразитных сигналов и накладывает определенные трудности при проектировании. Использование дифференциальной структуры СВЧ-тракта позволяет уменьшить влияние паразитных составляющих.

Используются нестандартные конструктивные решения, которые обеспечивают необходимую высокую выходную мощность в широком диапазоне частот (50 МГц — 5 ГГц). Данная структура позволяет регулировать полосу гетеродина модулятора в соответствии с выходной частотой синтезатора.

Выбор технологии для разработки квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот основан на возможности реализации требуемых параметров, а также обобщенных результатах исследования характеристик ЭКБ по критериям радиационной стойкости. Технология SiGe БиКМОП обеспечивает требуемый уровень стойкости к специальным внешним воздействующим факторам (СВВФ) при условии реализации методов повышения стойкости.

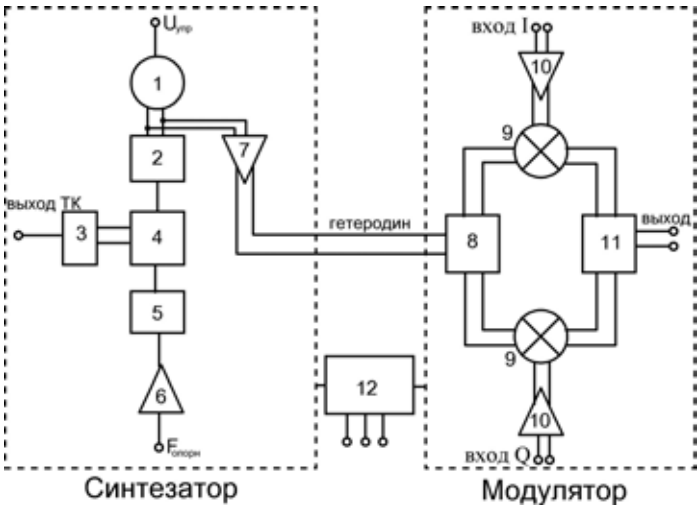



**Рис. 1.** Блок-схема квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот: 1 — генератор, управляемый напряжением (ГУН), 2 — делитель ГУН, 3 — токовый ключ, 4 — частотно-фазовый детектор (ЧФД), 5 — делитель опорного сигнала, 6 — буфер опорного сигнала, 7 — выходной буфер, 8 — генератор квадратурного сигнала с усилителями-ограничителями, 9 — смесители, 10 — входные каскады, 11 — выходной блок, 12 — цифровой блок управления

Квадратурный модулятор со встроенным синтезатором частот изготовлен с использованием элементов цифровой библиотеки с кольцевыми затворами, разработанной специально для повышения радиационной стойкости и уменьшения токов утечки. Квадратурный модулятор со встроенным синтезатором частот

на основе ФАПЧ состоит из: генератора, управляемым напряжением (ГУН) (1); делителя ГУН (2); токового ключа (ТК) (3); частотно-фазового детектора (ЧФД) (4); делителя опорного сигнала (5); буфера опорного сигнала (6); выходного буфера (7); генератора квадратурного сигнала с усилителями-ограничителями (8); смесителей (9); входных каскадов (10); выходного каскада (11) и цифрового блока управления (12). Структура модулятора представлена на рис. 1.

Микросхема квадратурного модулятора организована следующим образом. Дифференциальный ГУН (ДГУН) формирует сигнал для цепи ФАПЧ и гетеродина модулятора. В цепи ФАПЧ выходной сигнал с генератора после делителя сравнивается на частотно-фазовом детекторе с опорным сигналом, результат сравнения используется для подстройки управляемого генератора. В тракте гетеродина модулятора формируется квадратурная составляющая. На частотах от 1 до 5 ГГц квадратурный сигнал формируется с помощью полифазного фильтра, а на частотах меньше 1 ГГц — с помощью делителя частоты.

Авторы считают, что новыми в данной работе являются использованные архитектурные, схемотехнические и конструктивно-топологические решения при разработке многоцелевого широкополосного квадратурного модулятора со встроенным синтезатором частот.

Результаты проектирования показывают, что МИС широкополосного модулятора 50 МГц — 5 ГГц со встроенным синтезатором частот имеет коэффициент передачи не менее 0 дБ, уровень фазовых шумов сигнала гетеродина на отстройке 1 МГц не более минус 126 дБн/Гц, линейность по выходу не менее 10 дБм, ток потребления не превышает 290 мА. Площадь кристалла — $3 \times 3$ мм$^2$.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.429.433

# Высоковольтная интегральная схема управляемого ключа HEMT на гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$

## High-voltage $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ HEMT Switch Integrated Circuit

**Максимов А. Н., Краснов А. А., Корнеев С. В., Крымко М. М.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*

**Maksimov A. N., Krasnov A. A., Korneev S. V., Krymko M. M.**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*

Рассмотрены особенности высоковольтных ИС управляемого ключа HEMT с двумя барьерными слоями. Введение второго барьерного слоя приводит к лучшему удержанию электронов в канальном слое GaN, при этом происходят снижение максимальной плотности концентрации носителей (ДЕГ) в канале и сдвиг порогового напряжения в положительную сторону. Рассмотрено влияние концентрации мольных долей Al как в верхнем, так и в нижнем барьерных слоях на величину носителей в канальном слое (двумерного электронного газа). Разработана ИС управляемого ключа HEMT, приведены ее характеристики.
**Ключевые слова:** двумерный электронный газ (ДЕГ); нитрид галлия (GaN); HEMT-транзистор с высокой подвижностью электронов.

We have researched the features of high-voltage HEMT switch ICs with two barrier layers. The introduction of the second barrier leads to better electron confinement in the GaN channel, with a decrease in the maximum carrier density in the channel (2DEG) and a shift of the threshold voltage to the positive numbers. We have studied how the concentration of Al molar fractions in both the upper and the lower barrier layers influences the amount of carriers in the channel layer (2DEG). We have presented the designed HEMT switch IC and shown its parameters.
**Keywords:** two-dimensional electron gas (2DEG); gallium nitride (GaN); HEMT.

Введение второго барьерного слоя $Al_yGa_{1-y}N$ приводит к скачкообразному увеличению высоты барьера в зоне проводимости и лучшему удерживанию электронов в канальном слое GaN. Электроны из канального слоя не могут распространяться в буферный слой при высоком напряжении на стоке, и вследствие этого увеличивается напряжение пробоя транзистора и снижаются токи утечки стока. Результат моделирования (рис. 1) показывает, что для структуры транзистора без обратного барьерного слоя $Al_yGa_{1-y}N$ электроны легко распространяются в буферный слой и их плотность довольная высокая, а для структуры с двумя барьерными слоями электроны хорошо удерживаются в канальном слое GaN.

Разработанная ИС управляемого ключа HEMT на гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ — это устройство, состоящее из схемы управления и высоковольтного ключевого транзистора (рис. 2). На транзисторах 1А-6А выполнена схема управления высоковольтным транзисторным ключом 7А.

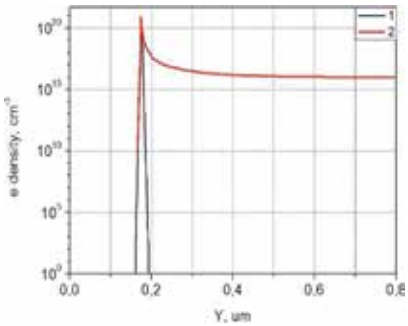



**Рис. 1.** Зависимость распространения электронов:
1) с барьерным слоем $Al_yGa_{1-y}N$, 2) только с буферным слоем GaN

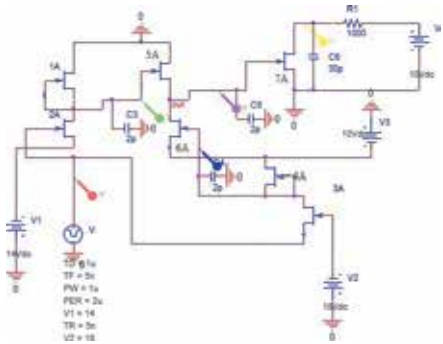


**Рис. 2.** ИС управляемого ключа

| Характеристики | | |
|---|---|---|
| **Обозначение** | **Наименование, ед. изм. (режим измерения)** | **Значение, не более** |
| $R_{DSON}$ | Сопротивление ключа в открытом состоянии, мОм (Ic = 5 А) | 80 |
| $I_{yrl}$ | Ток утечки, мА ($U_{CC}$ = 250 В) | 3 |
| $I_C$ | Коммутируемый ток, А | 30 |
| $t_{ON}$ | Задержка включения, нс ($U_{InL}$ = 0,4 В до $U_{InH}$ = 5 В, $U_{CC}$ = 30 В) | 5 |
| $t_{OFF}$ | Задержка выключения, нс ($U_{InL}$ = 5 В до $U_{InH}$ = 0,4 В, $U_{CC}$ = 30 В) | 5 |

Введение второго нижнего барьерного слоя $Al_yGa_{1-y}N$ позволило создать ИС управляемого ключа HEMT на напряжение 250 В и максимальный импульсный коммутируемый ток 30 А.

***Литература***

1. Максимов А. Н., Краснов А. А., Ивашко А. И., Ледовских А. П., Крымко М. М., Корнеев С. В., Синкевич В. Ф. Влияние второго барьерного слоя AlGaN на параметры силовых HEMT // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 1 (244), 2017. — С. 12–20.
2. Максимов А. Н. Образование двумерного электронного газа (ДЕГ) в структуре с двумя барьерными слоями $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2020. — Вып. 1 (256). — С. 4–16.

The introduction of the second $Al_yGa_{1-y}N$ layer leads to a sharp rise in the energy barrier of the conductive band and to a better electron confinement in the GaN channel layer. With high drain voltage the electrons in the channel layer cannot propagate into the buffer layer, resulting in the increase of the breakdown voltage and the decrease of the drain leakage current. Simulation results (fig. 1) show that in case of a transistor without the backside $Al_yGa_{1-y}N$ barrier layer electrons are easily propagating to the buffer layer and their density is fairly high, and in case of a transistor with two barrier layers electrons are well retained in the GaN channel layer.

The designed $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ HEMT switch IC is a device consisting of a control circuit and a high-voltage switch (fig. 2). The control circuit for the high-voltage switch 7A is realized by transistors 1A-6A.

| **Performance** | | |
|---|---|---|
| **Symbol** | **Parameter, unit** | **Value, ≤** |
| $R_{DSON}$ | Switch ON-state resistance, mOm, Ic = 5 A | 80 |
| $I_{ytl}$ | Leakage current, mA, $U_{CC}$ = 250 V | 3 |
| $I_C$ | Switching current, A | 30 |
| $t_{ON}$ | Turn-on delay, ns, $U_{InL}$ = 0.4 V up to $U_{InH}$ = 5 V, $U_{CC}$ = 30 V | 5 |
| $t_{OFF}$ | Turn-off delay, ns, $U_{InL}$ = 5 V up to $U_{InH}$ = 0.4 V, $U_{CC}$ = 30 V | 5 |

The introduction of the second lower barrier layer $Al_yGa_{1-y}N$ made it possible to create a 250 V HEMT switch IC with maximum pulse switching current of 30 A.

***References***

1. Maksimov A. N., Krasnov A. A., Ivashko A. I., Ledobskikh A. P., Krymko M. M., Korneev S. V., Sinkevich V. F. The effect of the second AlGaN barrier layer on the power HEMT performance. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Technology, 2017. Iss. 1 (244). P. 12–20.
2. Maksimov A. N. Formation of the two-dimensional electron gas (2DEG) in the structure with two $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ barrier layers. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices, 2020. Iss. 1 (256). P. 4–16.

УДК 621.382. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.432.434

# Разработка RSSI-микросхем со встроенным АЦП для изготовления по отечественной технологии

## Developing RSSI with Integrated ADC for Domestic Technology

**Репин В. В.[1], к. т. н., Морозов Д. Н.[1,2], Духов А. В.[1], Мухин И. И.[1], к. т. н.**
*[1] АО «НИИМА «Прогресс»*
*125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54*
*d.morozov@mri-progress.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Repin V. V.[1], Ph.D, Morozov D. N.[1,2], Dukhov A. V.[1], Mukhin I. I.[1], Ph.D**
*[1] Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC ("PROGRESS MRI" JSC)*
*54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia*
*d.morozov@mri-progress.ru*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

В работе представлены результаты разработки Received Signal Strength Indication (RSSI) для УПЧ в диапазоне 30–180 МГц и 300 кГц — 100 МГц с динамическим диапазоном свыше 70 дБ по технологии 180 нм БиКМОП SiGe с использованием двух оригинальных схемных решений: блока коррекции выходного тока детектора для непосредственного соединения RSSI с АЦП без использования внешних элементов и подстроек; схемы дополнительного усилительного каскада с отрицательной обратной связью (ОСС) по постоянному току для компенсации разброса технологических параметров усилителя.
**Ключевые слова:** RSSI; логарифмический детектор; АЦП; отрицательная обратная связь.

The paper presents the results of RSSI development (Received Signal Strength Indication) for IF amplifiers in 30 MHz — 180 MHz range and above 70 dB dynamic range. The amplifier was developed by a 180 nm BiCMOS SiGe technology in two versions: the circuit with an output current correction for connection to ADC without external adjustment, and the circuit with a direct current negative feedback (OSS) mirror amplifier for technological parameters compensation.
**Keywords:** RSSI; logarithmic detector; ADC; negative feedback.

В связи с ростом динамического диапазона приемных трактов и увеличением значения цифровой обработки сигнала возросла потребность в схемах индикации входной мощности приемного устройства (RSSI). Данные о величине входного сигнала позволяют избежать перегрузки и используются для цифрового управления, позволяя обеспечивать требуемый диапазон величин входных сигналов. Зарубежные аналоги требуют наличия ряда дополнительных выводов для подстройки и подключения внешних регулируемых резисторов и блокирующих конденсаторов большой емкости, что не всегда осуществимо и накладывает определенные ограничения.

В работе рассмотрены два варианта логарифмических детекторов — с использованием внутренней корректировки нулевого уровня выходного сигнала детектора и усилителя с компенсацией технологического разброса.

В одном из представленных RSSI для УПЧ в диапазоне 30–180 МГц в кристалле использованы разделительные внутренние конденсаторы малых номиналов для решения проблемы разбаланса усилительных каскадов по постоянному току из-за технологических разбросов. Схема состоит из последовательно соединенных звеньев, содержащих усилитель-ограничитель (УО) и детектор, сигнал с которого суммируется на общей нагрузке и при правильно выбранном коэффициенте передачи и пороге УО обеспечивает логарифмическую зависимость между уровнем мощности входного сигнала и выходным напряжением.

При использовании детектора на перекошенном дифференциальном каскаде возникает определенный выходной сигнал при нулевой входной мощности. Для коррекции в общеизвестных аналогах используется внешняя подстройка. За счет введения блока коррекции выходного тока детектора такая подстройка не требуется. Принцип работы заключается в использовании детектора, идентичного основному, но без подачи на него сигнала, а статический ток на выходе в противофазе складывается с током основного детектора. Таким образом, обеспечивается нулевое смещение при отсутствии входного сигнала.

Представленная структура позволяет изготавливать схемы RSSI УПЧ с диапазоном свыше 70 дБ совместно с 8-разрядным АЦП на одном кристалле, с аналоговым и цифровым выходами и встроенным блоком питания типа Band Gap. АЦП для уменьшения потребляемой мощности выполнен по методу последовательного приближения (SAR) с тактовой частотой до 200 МГц и выходной частотой до 20 МГц.

Сигнал с выходного конденсатора RSSI, который выдает определенный постоянный уровень при заданном входном сигнале, поступает на АЦП через корректирующий усилитель, обеспечивающий необходимую подстройку при изменении температуры.

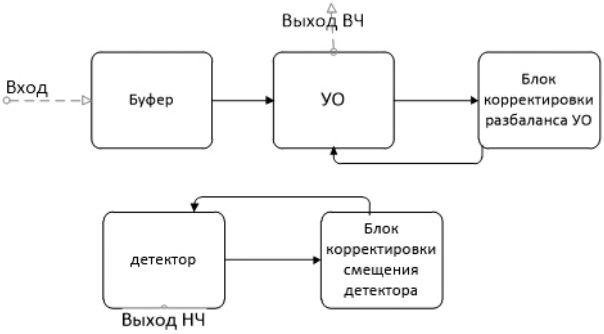



**Рис. 1.** Блок-схема RSSI с гальванической связью

В следующем варианте логарифмического детектора для трактов прямого усиления используются каскады с гальванической связью. В процессе производства пластин неминуемо образование несимметричных элементов в критических

частях микросхемы. Топологическое согласование дифференциальных элементов позволяет компенсировать этот уход, но не избежать полностью. Уменьшение расхождения дифференциальных усилительных каскадов необходимо для работы с сигналами малой мощности, уровень которых близок к уровню рассогласования. Для решения данной задачи предложена схема компенсации разбаланса усилителей с помощью использования дополнительного усилительного каскада, топологически совмещенного с основным УО, но охваченного отрицательной обратной связью (ООС) по постоянному току и без подачи на него переменного сигнала. Блок-схема звена RSSI с гальванической связью представлена на рис. 1.

В статье приводятся результаты схемотехнического проектирования кристаллов, содержащих два варианта схемы RSSI: со связью по переменному току и с гальванической связью. Особенностью схемотехнических решений являются предложенные блоки коррекции смещения детектора и разбаланса усилителя. Использован принцип применения дополнительных каскадов, идентичных основным, без подачи на них переменного сигнала, с регулировкой по постоянному току, что позволяет проводить корректировки смещения без влияния на сигнальные цепи.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.435.437

# Приемный тракт миллиметрового диапазона с подавлением зеркального канала

## Mm-wave Receiving Tract with Image Channel Suppression

**Редька Ан. В.[1], Миннебаев В. М.[1,3], Краснов В. В.[2]**
*[1] АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*
*[2] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
*119991, г. Москва, Ленинский просп., 53*
*[3] МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

**Redka An. V.[1], Minnebaev V. M.[1,3], Krasnov V. V.[2]**
*[1] "Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*
*[2] Lebedev Physical Institute of the RAS*
*53 Leninskiy Ave., Moscow, 119991*
*[3] MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

В работе представлены результаты модернизации малошумящего усилителя миллиметрового диапазона частот, предназначенного для работы в системах радиоастрономического наблюдения, функционирующих при низких температурах среды (от 20 К).
**Ключевые слова:** малошумящий усилитель; криогенные температуры; криоМШУ; МИС.

The paper presents the results of upgrading an mm-band low-noise amplifier intended for astronomy observation applications operating at low ambient temperatures (20 K and higher).
**Keywords:** low-noise amplifier; cryogenic temperatures; cryoLNA; MIC

При проектировании малошумящего усилителя миллиметрового диапазона частот перед разработчиками стоит ряд задач [1]:

- выбор активной элементной базы усилителя, способной устойчиво работать при криогенных температурах;
- повторяемость шумовых и амплитудных характеристик МШУ при криогенных температурах;
- подавление зеркального канала приема в целях снижения уровня шумовой мощности, поступающей на вход детекторов сигнала;
- минимизация энергопотребления модулей в целях, во-первых, минимизации времени выхода криоблока на стационарный режим и, во-вторых, снижения собственной температуры модулей МШУ;
- минимизация габаритных размеров модулей МШУ для снижения теплового сопротивления и снижения габаритов криоблока.

Авторами проведены исследования макетов малошумящих усилителей на основе дискретных транзисторов на нитриде галлия производства

АО «НПП «Пульсар» и монолитных схем малошумящих усилителей миллиметрового диапазона на нитриде галлия производства ИСВЧПЭ РАН [2].

Важной задачей в аппаратуре применения является подавление зеркального канала приема для снижения уровня шумовой мощности, поступающей на вход детекторов сигнала. Для этого был разработан и изготовлен полосно-пропускающий фильтр (ППФ) на подложке Al2O3 с потерями не более 1 дБ и подавлением зеркальных частот не менее 17 дБ.

В результате проведения работ на первом этапе установлено, что коэффициент усиления двухкаскадного усилителя составляет не более 24 дБ при коэффициенте усиления одной МИС CHA2090 19 дБ, что связано либо с объемными эффектами в корпусе, либо с отсутствием развязки между первым и вторым каскадом усиления.

Для решения указанной задачи проведен дополнительный электромагнитный расчет двухкаскадного усилителя с учетом объемных эффектов корпуса.

Рассчитан, изготовлен и применен в составе усилителя ферритовый микрополосковый фильтр, позволивший обеспечить необходимый уровень развязки между каскадами усилителя.

***Литература***

1. Краснов В. В., Миннебаев В. М. Криогенный малошумящий усилитель 8-мм диапазона на базе МИС XL1000 // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 2008 г. — Вып. 2. — С. 30–33.
2. Krasnov V. V., Minnebaev V. M., Redka An. V. The Research of Low-Noise GaN HEMT of Cryogenic Temperatures // Национальная ассоциация ученых (НАУ), 2020. — № 52. — С. 32–36. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.3.52.152.

Designing an mm-wave low-noise amplifier requires a number of issues to be resolved [1]:

- Selection of active components capable of stable operation at cryogenic temperatures;
- Consistency of noise and amplitude performance of an LNA at cryogenic temperatures;
- Suppression of the receiving image channel in order to reduce the level of noise power on the input of the signal detectors;
- Minimization of the LNA modules power consumption to minimize the time for the cryoblock to reach the stationary mode and to reduce the temperature of the modules;
- Minimization of the LNA modules size and weight to reduce the thermal resistance and the dimensions of the cryoblock.

We have carried out studies of low-noise amplifier models based on S&PE Pulsar discrete GaN transistors and ISVCH RAS monolithic integrated circuits of mm-wave GaN low-noise amplifiers [2].

For target applications it is important to suppress the receiving image channel to decrease noise power level at the input. To achieve this, we have developed and produced a band-pass filter on an $Al_2O_3$ substrate with losses no more than 1 dB and image frequency suppression no less than 17 dB.

At the first stage of our research we found out that a gain of the two-stage amplifier is no more than 24 dB, and a gain of a single CHA2090 MIC is 19 dB. This is associated either with volumetric effects within the case, or with the lack of isolation between the first and the second stages.

To solve the issue we have conducted additional electromagnetic simulation of the amplifier taking into account the volumetric effects within the case.

We have designed and manufactured a ferrite microstrip filter built in the amplifier to provide the necessary level of isolation between the amplifier stages.

***References***

1. Krasnov V. V., Minnebaev V. M. 8-mm wave cryogenic low-noise amplifier based on XL1000 MIC. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices, 2008. Iss. 2. P. 30–33.
2. Krasnov V. V., Minnebaev V. M., Redka An. V. The research of low-noise GaN HEMT of cryogenic temperatures. National Association of Scientists, 2020. № 52. P. 32–36, DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.3.52.152.

УДК 621.383 + 621.396.624 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.438.439

# Фотонно-электронная интегральная схема на основе SiGe БиКМОП-технологии и модуль оптического приемника для систем передачи данных до 25 Гб/с

## SiGe BiCMOS Photonic-electronic Integrated Circuit and Receiver Module for 25 Gb/s Optical Links

**Коколов А. А.[1,2], к. т. н., Коряковцев А. С., Шеерман Ф. И.[1], к. т. н., Бабак Л. И.[1], д. т. н., Конкин Д. А.[1]**
*[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*
*kokolovaa@gmail.com*
*[2] Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН*
*634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

**Kokolov A. A.[1,2], Ph.D, Koryakovtsev A. S.[1], Sheyerman F. I.[1], Ph.D, Babak L. I.[1], Sc.D, Konkin D. A.[1]**
*[1] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR University)*
*40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia*
*kokolovaa@gmail.com*
*[2] V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS*
*1 Academician Zuev Sq., Tomsk, 634055, Russia*

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования однокристальной фотонно-электронной интегральной схемы (ФЭИС) оптического приемника и модуля на его основе. ФЭИС изготовлена на базе 0,25-мкм SiGe БиКМОП-технологии и может использоваться в оптических системах передачи данных со скоростями до 25 Гб/с.
**Ключевые слова:** кремниевая фотоника; оптические системы передачи данных; 25 Гб/с; SiGe БиКМОП.

Потребности в стремительно растущих скоростях передачи данных (до 400 Гб/с и выше) в волоконно-оптических системах обусловлены увеличением объема передаваемого трафика, разработкой перспективных систем телекоммуникации 5G и 6G, развитием облачных хранилищ данных и др. В связи с ростом количества оптических приемопередатчиков в таких системах весьма актуальными являются вопросы миниатюризации и снижения финансовых затрат на их производство. Именно благодаря низкой стоимости внимание разработчиков привлечено к интегральным фотонным технологиям, которые, помимо резкого уменьшения габаритов, веса и стоимости волоконно-оптических систем, позволяют значительно улучшить многие другие характеристики: быстродействие, полосу частот, надежность, технологичность и др. [1].

В докладе рассматриваются результаты разработки и экспериментального исследования однокристальной фотонно-электронной интегральной схемы (ФЭИС) оптического приемника (ОП) и модуля на ее основе для применения в оптических

системах передачи данных со скоростями до 25 Гб/с. ФЭИС выполнена по 0,25-мкм SiGe БиКМОП-технологии.

ОП выполнен по схеме прямого детектирования и предназначен для приема оптических сигналов с амплитудной модуляцией (NRZ-сигнал). Приемник на однм кристалле содержит устройство ввода излучения в интегральную схему (ИС), оптический волновод для связи с фотодиодом (ФД), сам ФД и широкополосный трансимпедансный усилитель (ТИУ).

Для измерения коэффициента оптоэлектронного преобразования ОП использован двухсигнальный метод оптического гетеродинирования [2]. На вход ФЭИС при помощи оптического зонда подаются два оптических сигнала с близкими по значению частотами $f_1$ и $f_2$. В результате детектирования на ФД формируется модулированный СВЧ-сигнал с частотой модуляции, равной разностной частоте $f_1$-$f_2$, который усиливается ТИУ и снимается с выхода микросхемы при помощи СВЧ-зонда. Уровень выходного сигнала фиксируется при помощи анализатора спектра. При длине волны 1550 нм измеренная полоса пропускания приемника по уровню −3 дБ составила 22,5 ГГц, что позволяет использовать его для передачи цифровых сигналов со скоростью до 25 Гб/с. В частотном диапазоне СВЧ-сигнала до 30 ГГц типовые значения коэффициентов отражения на обоих выходах ФЭИС ОП ($|S_{22}|$ и $|S_{33}|$) не хуже −15 дБ, коэффициент трансимпедансного усиления ТИУ $Z_T$ = 60–62 дБ·Ω. Размеры ФЭИС — 1,45×0,86 мм$^2$ с учетом контактных площадок, потребляемая мощность — 160 мВт.

На этой основе был разработан также оптический модуль, который представляет собой ФЭИС ОП в металлокерамическом корпусе (размеры 18×12 мм$^2$), установленную на печатной плате. На плате, кроме модуля, также размещены USB-разъем для подачи напряжения питания, стабилизаторы напряжения и др. Модуль был использован для проведения измерений скорости передачи данных в составе оптической линии. В качестве передатчика использовался QFSP-модуль производства компании ООО «Файбер-трейд». Результаты экспериментального исследования показали, что оптический модуль позволяет осуществлять прием цифровых данных со скоростью по крайней мере не менее 11,3 Гб/с (скорость ограничена доступным измерительным оборудованием) при размахе выходного напряжения $V_{pp} \approx 200$ мВ и джиттере менее 21 пс.

***Изготовление ФЭИС и оптического модуля выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проектная часть ГЗ. Уникальный идентификатор 8.4029.2017/4.6. Экспериментальные результаты получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, базовая часть ГЗ. Уникальный идентификатор FEWM-2020-0046.***

***Литература***

1. Chrostowski L. and Hochberg M. Silicon Photonics Design. Cambridge University Press, 2015.
2. Dennis T., Hale P. High-accuracy photoreceiver frequency response measurements at 1.55 um by use of a heterodyne phase-locked loop // Optics Express, 2011. Vol. 19. № 21. P. 20103–20114.

УДК 621.375.4 + 621.376.6 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.440.442

# Повышение пропускной способности канала передачи данных на большие расстояния при распространении сигнала от космического аппарата до наземных станций приема в условиях прямой видимости

## Increasing the Data Transmission Channel Bandwidth Over the Long Distances when the Signal is Propagated from the Spacecraft to the Ground Reception Stations in the Optical Visibility Conditions

**Ревонченков А. А., Перевезенцев А. В., Лычагин А. Ю., Бурцев Ю. В., Дроздова С. Ю.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*
*revonchenkov_aa@pulsarnpp.ru*

**Revonchenkov A. A., Perevezentsev A. V., Lychagin A. Yu., Burtsev Yu. V., Drozdova S. Yu., Ph.D**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*
*revonchenkov_aa@pulsarnpp.ru*

Новые системы зондирования земной поверхности позволяют увеличить время непрерывной съемки и ее детальность, однако существующие системы высокоскоростного радиоканала не обеспечивают достаточную пропускную способность [1]. В целях повышения пропускной способности радиоканала разработаны конструктивные и схемотехнические решения для построения нового передающего модуля на основе GaN-транзисторов.

**Ключевые слова:** высокоскоростной радиоканал (ВРК); дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ); высокоскоростная бортовая радиолиния; АФАР; амплитудно-фазовая модуляция; GaN-транзисторы.

Применение нитрида галлия [2–3] позволяет достичь качественно лучших результатов, нежели традиционные материалы. Это связано со следующими особенностями (рис. 1):

- GaN HEMT полевые транзисторы обладают стойкостью к ионизирующим излучениям, что снимает необходимость располагать передатчик в отсеке с защитой от ТЗЧ;
- высокое напряжение пробоя GaN-устройств (до 150–200 В) делает их устойчивыми и позволяет транзистору работать при напряжениях питания до 50–80 В;
- большие входное и выходное сопротивления транзистора способствуют существенному упрощению согласующих цепей.

Практическая реализация макета радиолинии с передающим модулем на GaN подтвердила улучшение основных характеристик радиоканала и повышение достоверности передачи информации, при этом коэффициент битовой ошибки нового модуля составил $7 \cdot 10^{-7}$, а пропускная способность канала суммарно составила

1800 Мбит/с, что покрывает потребность в передаче данных по нисходящей линии разрабатываемых систем РСА ДЗЗ. Применение системы цифрового ППМ со встроенной системой управления позволило минимизировать затраты на лабораторный эксперимент по аппаратной части и программно-алгоритмическому обеспечению.

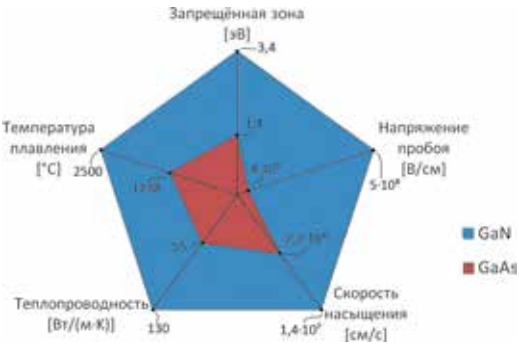



**Рис. 1.** Создан и опробован в натурном эксперименте макет приемо-передающей высокоскоростной радиолинии для применения в условиях прямой видимости в качестве передачи на наземный сегмент данных с РСА (рис. 2)

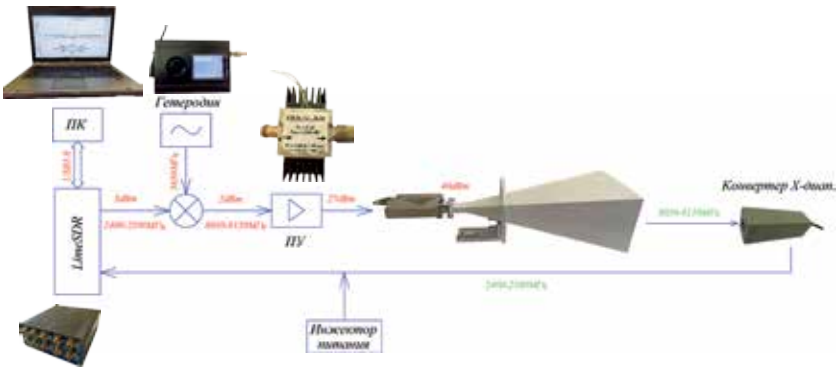



**Рис. 2.** Рассмотрена методика лабораторных и полигонных испытаний с использованием СПО управления и обработки на языке python. Это позволило отработать комплексный метод передачи информации на основе отечественной ЭКБ с использованием программно-определяемой радиосистемы, разработана программная модель приемно-передающего радиоканала

***Литература***

1. Кащеев А. А. Системный подход к выбору пропускной способности высокоскоростной радиолинии для современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. Королёва С. П., 2016. — Т. 15. — № 1. — С. 180–186.

2. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. УДК 621.382.3 Применение GaN-устройств в условиях космического пространства.
3. Глыбин А. А., Бурцев Ю. В., Лычагин А. Ю., Черевань Д. В. Технология комплексных натурных испытаний антенных модулей АФАР.
4. Белолипецкий А. В., Борисов О. В., Герасимов А. О., Колковский Ю. В., Лычагин А. Ю., Миннебаев В. М., Осиповский А. А., Редька Ал. В., Редька Ан. В., Хабаров И. А. Модуль антенный АФАР X-диапазона // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы XV Научно-технической конференции, 2017. — С. 288–289.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.443.446

# Оценка разрешения высокодетальной твердотельной системы ДЗЗ околоземного базирования X-диапазона с подтверждением натурным экспериментом

## Evaluation of the Resolution of the X-range DCZ High-aligned Solid-state System of the Near Earth Deployment with Confirmation by the Experiment

**Болтиков Р. С.[1], Болтиков С. В.[2], к. т. н., Бурцев Ю. В.[1], к. т. н., Лычагин А. Ю.[1], Миннебаев В. М.[1], к. т. н., Ревонченков А. А.[1]**
*[1] АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*
*[2] Госкорпорация «Роскосмос»*
*107996, ГСП-6, г. Москва, ул. Щепкина, 42*

**Boltikov R. S.[1], Boltikov S. V.[2], Ph.D, Burtsev Yu. V.[1], Ph.D, Lychagin A. Yu.[1], Minnebayev V. M.[1], Ph.D, Revonchenkov A. A.[1]**
*[1] "Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*
*[2] State Space Corporation ROSCOSMOS*
*42, Schepkina st., Moscow, RUSSIA, GSP-6, 107996*

Рассмотрена возможность определения целевых параметров твердотельной субапертурной АФАР с применением широкополосного ЛЧМ-сигнала от начального этапа разработки до верификационных испытаний.
**Ключевые слова:** АФАР; РСА ДЗЗ; пространственное разрешение.

На данный момент опыт создания и наземных испытаний РСА ДЗЗ не позволяет рассматривать возможность сквозного контроля целевых характеристик (пространственного разрешения) субапертурной системы на начальных этапах, от эскизного проектирования до отработки целевого изделия. Как правило, процесс оценки пространственного разрешения выполняется на этапе валидационных испытаний методом импульсного отклика при измерениях по калибровочным мирам-отражателям с известной ЭПР [1].

В предложенном нами методе выполняются оценки пространственного разрешения, начиная с этапа эскизного проекта и вплоть до этапа калибровки итогового изделия.

Проектирование схемы диаграммообразования АФАР РСА ДЗЗ выполняется по субапертурной схеме, что позволяет уменьшить количество активных компонентов и снизить массогабаритные параметры (рис. 1).

Существующий подход к декомпозиции блоков АФАР при расчете и производстве на составляющие блоки с последующим контролем СВЧ-параметров не позволяет комплексно оценить параметры РСА. Авторами выполнено моделирование комплексных параметров системы с учетом динамических параметров структуры твердотельного ППМ системы диаграммообразования и особенностей излучающей системы РСА. Учитывалось влияние СВЧ-характеристик сквозного канала с пространственным сжатием сигнала в излучающей и приемной апертуре АФАР.

Параметры сжатого ЛЧМ-импульса при прохождении через тракт РСА описываются выражением 1:

$$\Psi_{\Sigma}(\tau,\tau_u,\theta_0)=\left[\frac{1}{N_y^2}\sum_{i=0}^{N_y-1}\sum_{j=0}^{N_y-1}\Psi\left(\tau-\frac{d_y}{c}(i+j)\sin\theta_0,\tau_u\right)\right]\cdot\sin c\left[\pi/\lambda d_y(N_y-1)(\sin\theta-\sin\theta_0)\right], \quad (1)$$

где i, j — порядковый номер излучателя АФАР с конфигурацией i*j излучающих точек, $N_y$ — число излучателей в линейке по OY, $\mathrm{sinc}[\pi/\lambda d_y(N_y-1)(\sin\theta-\sin\theta_0)]$ — диаграмма направленности АФАР в классическом виде.

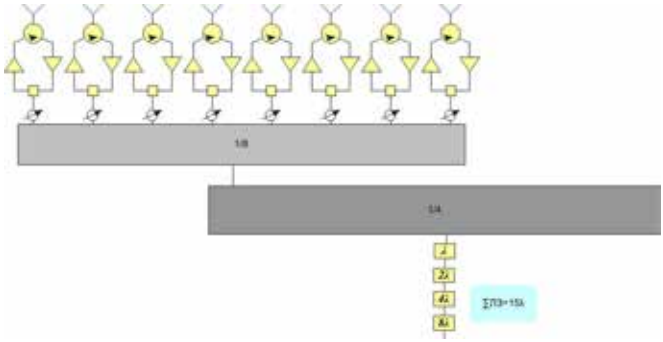


**Рис. 1.** Схемотехническое решение субапертурного модуля АФАР РСА ДЗЗ

Операция оценки пространственного разрешения сводится к оценке ширины сформированного импульсного отклика в виде пространственно-временной модели сквозного прохождения ЛЧМ-сигнала.

Результаты моделирования на этапе эскизного проекта, представленные оптимизированным схемотехническим решением (рис. 1) субапертурного блока, рассматривались с расчетным значением девиации частоты импульса и угла отклонения луча сравнением с импульсом отклика идеальной АФАР. Сравнением АКФ рассчитанного и эталонного сигналов определяются параметры сквозного тракта для динамического сигнала РСА для разных углов сканирования, по ширине главного лепестка отклика определяется радиометрическое разрешение для расчетной модели и идеальной АФАР (в случае нелинейных искажений сквозного тракта приема-передачи наблюдаются деградация АКФ, смещение и, как следствие, ухудшение разрешающей способности). Возможность контроля данного параметра (импульсного отклика) при расчетах, на натурных испытаниях и постановке производства позволяет получать заданные целевые характеристики для РСА.

Данный подход позволил оптимизировать схемотехническое решение по целевому параметру при проектировании и предварительно рассмотреть характеристики на этапе расчетов, подтвердить оценку разрешения на местности для изготовленного опытного образца при подготовке к лабораторным и натурным испытаниям (рис. 2, рис. 3) [3].

Натурные испытания, проведенные с применением авиационного носителя по нормированной цели (проведение натурной калибровки), подтвердили

расчетные показатели, позволили использовать подход для расчета и оценки параметров РСА на соответствие требуемым параметрам [4] рис. 3.

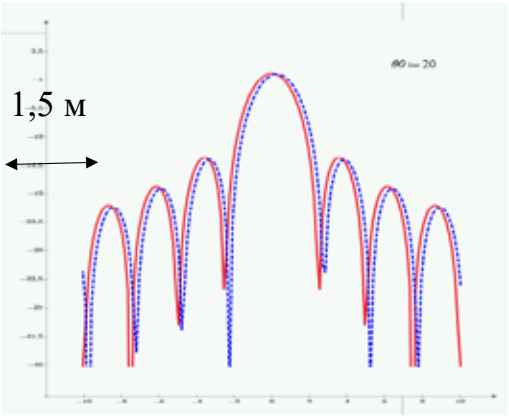



**Рис. 2.** Двухсторонний сжатый импульс для схемотехники с формирователем на линиях задержки (ЛЗ) и фазовращателях (ФВ), отклонение 20° (синий), идеальная АФАР (красный)

По результатам итоговой отработки натурных испытаний субапертурного модуля получены радиоконтрастные изображения поверхности (рис. 5), которые также подтверждают заданные характеристики, отработанные по предложенному методу.

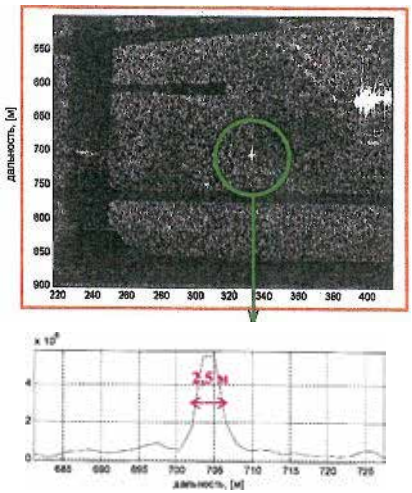



**Рис. 3.** Радиоконтрастные изображения местности

Таким образом, предложенный метод позволяет проводить сквозной контроль целевых характеристик (пространственного разрешения) субапертурной системы на всех этапах создания изделия.

***Литература***

1. Лепехина Т. А., Николаев В. И., Толстов Е. Ф. Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика. URL: http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S4_14.pdf.
2. Прилуцкий А. А. Возбуждение АФАР больших электрических размеров широкополосным ЛЧМ-сигналом // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2016. — Выпуск 1. — (240). — С. 4–18.
3. Белолипецкий А. В., Борисов О. В., Герасимов А. О., Колковский Ю. В. и др. Модуль антенный АФАР X-диапазона // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА // Материалы XV научно-технической конференции, 2017. — С. 288–289.
4. Глыбин А. А., Бурцев Ю. В. Лычагин А. Ю. Черевань Д. В. Технология комплексных натурных испытаний антенных модулей АФАР // Наноиндустрия. — Спецвыпуск 2019. — № S (89). — С. 463–469.

УДК 621.317.75 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.447.449

# Сверхширокополосные измерения на подложке с помощью электрооптической стробоскопической измерительной установки

## Ultra-wideband Measurements on a Substrate Using the Electro-optic Sampling System

**Клеопин А. В.**, **к. т. н.**, **Зенченко М. А.**
*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»*
*141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, Менделеево*
*kleopin@vniiftri.ru, zenchenko@vniiftri.ru*

**Kleopin A. V., Ph.D, Zenchenko M. A.**
*The Federal State Unitary Enterprise "Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering"*
*Mendeleevo, Moscow Region, Russia, 141570*
*kleopin@vniiftri.ru, zenchenko@vniiftri.ru*

Проведены исследования частотных и энергетических параметров согласованной копланарной линии на подложке из низкотемпературного GaAs, планируемой к применению в качестве центрального узла электрооптической стробоскопической измерительной установки с полосой пропускания выше 110 ГГц.
**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс; электрооптическое стробирование; фемтосекундный лазер; копланарная линия.

The paper deals with research on frequency and power related parameters of the matched coplanar waveguide on LT-GaAs substrate. The coplanar waveguide can be used as central unit of an electro-optic sampling system with a bandwidth above 110 GHz.
**Keywords:** ultra-short electrical pulse; electro-optic sampling; femtosecond laser; coplanar waveguide.

В настоящее время вместо модульной структуры радиоэлектронной аппаратуры с межблочными соединениями коаксиальными линиями или волноводами все чаще используются интегральные компоненты. Поэтому измерения в радиотехнике требуется проводить непосредственно на подложке без использования каких-либо соединителей [1].

При развитии таких измерений появятся новые пробники, измерительные зонды и радиофотонные измерительные преобразователи. Для оценки параметров (или калибровки) указанных средств измерений необходимо создание электрооптических стробоскопических (ЭОС) измерительных систем, с помощью которых будет возможно обеспечить измерение формы электрических сигналов с субтерагерцевой шириной спектра непосредственно в конкретной точке на копланарной микрополосковой линии. Современные импульсные лазеры могут генерировать импульсы длительностью 0,1 пс и менее. Электрооптическое стробирование основано на линейном электрооптическом эффекте (эффект Поккельса) в некоторых

кристаллах (низкотемпературном арсениде галлия LT-GaAs, танталате лития $LiTaO_3$ и др.) [2]. Линейно поляризованный оптический луч, распространяющийся сквозь кристалл, меняет свою поляризацию в зависимости от приложенного электрического поля. Для стробирования (выборки) электрических сигналов необходимо разработать фотопроводящий ключ — копланарную линию с субпикосекундным временем отклика [3].

Графическое представление копланарной линии (CPW) с обозначением необходимых для расчета размеров показано на рис. 1.

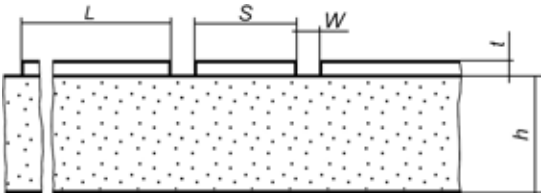
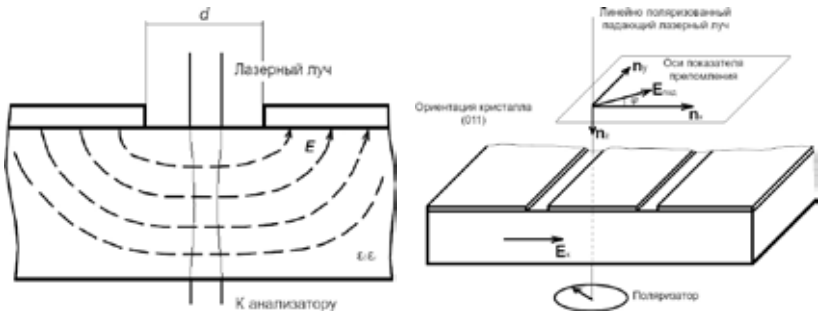



**Рис. 1.** Копланарная линия

Волновое сопротивление $Z$ находится в пределах от 50,1 до 48,9 Ом в диапазоне частот от 0 до 100 ГГц при следующей конфигурации копланарной линии: $S = 59$ мкм, $W = 50$ мкм, $h = 200$ мкм, $t = 5$ мкм. Предельная частота $f_{TE}$ равна 108,7 ГГц. Время прохождения лазерного импульса через подложку толщиной $h = 200$ мкм составляет 2,25 пс. Электрический импульс с длительностью, равной полученному времени прохождения луча, занимает эффективную полосу частот до 160 ГГц.

Для расчетов энергетических характеристик ЭОС-установки принималось, что электрическое поле в толще подложки при прохождении лазерного импульса однородно и стационарно. Это поле образуется электрическим импульсом с амплитудой 1 В (рис. 2*а*).




*а* *б*

**Рис. 2.** Распределение электрического поля в толще подложки (*а*); распространение лазерного луча в системе (*б*)

На рис. 2*б* изображены направления осей показателя преломления и векторов напряженности электрического поля лазерного излучения и электрического поля в подложке.

Выражение для интенсивности прошедшего через поляризатор лазерного излучения:

$$I_{\text{прош}} = I_{\text{изл}} \cdot t^2_{\text{в/}GaAs} \cdot t^2_{GaAs/\text{в}} \cdot \sigma^2 \cdot \sin^2(2\psi) \cdot \sin^2\left(\frac{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi h}{\lambda} n^3_{GaAs} r_{41} E_x}{2}\right),$$

где $\psi$ — угол между вектором напряженности электрического поля излучения и осью $\mathbf{n}_x$, рад; $t_{\text{в/GaAs}}$, $t_{\text{GaAs/в}}$ — коэффициенты пропускания излучения при пересечении границы сред воздух/GaAs и наоборот соответственно; $\sigma$ — коэффициент поглощения; $\lambda$ — длина волны лазерного излучения, м; $n_{\text{GaAs}}$ — показатель преломления LT-GaAs; $r_{41}$ — электрооптический коэффициент LT-GaAs; $E_x$ — напряженность электрического поля в подложке, создаваемая приложенным импульсным напряжением, В/м.

Интенсивность прошедшего через поляризатор излучения достигает наибольшего значения при $\psi = \pi/4$. Для смещения рабочей точки ЭОС-системы целесообразно использовать четвертьволновую пластину. Интенсивность излучения, падающего на подложку, при рассчитанном размере пятна 42,2 мкм равна 2,14–4,27 МВт/мм$^2$, следовательно, для предотвращения оптического разрушения нужно включить в оптическую схему ЭОС-установки ослабляющие элементы.

В результате исследований установлено, что при следующих значениях: $\lambda = 1550$ нм; $n = 3{,}374$; $r = 0{,}54$; $t_{\text{в/GaAs}} = 0{,}457$; $t_{\text{GaAs/в}} = 1{,}543$; $r_{41} = 1{,}4 \cdot 10^{-12}$ м/В; $\alpha = 0{,}6$ [4]; энергия лазерного импульса — 1,2 нДж; длительность лазерного импульса — 100 фс; диаметр коллимированного лазерного пучка — 1 мм, отношение изменения интенсивности при приложенном напряжении 1 В к интенсивности в отсутствие напряжения равно $3{,}43 \cdot 10^{-5}$, при этом наблюдается линейная зависимость интенсивности прошедшего через поляризатор излучения от напряжения, приложенного к копланарной линии.

***Литература***


1. Swindlehurst A., Ayanoglu E., Heydari P. and Capolino F. Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution? // IEEE Communication Magazine, 2014. Vol. 52. №9. P. 56–62. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894453.
2. Kitazawa T., Hayashi Y. Quasistatic characteristics of a coplanar waveguide with thick metal coating // IEEE Proceedings. Vol. 133, pt. H. № 1. February 1986. P. 18–20.
3. Feng Z., Zhao K., Li B., Yang Z., Song Z. and Cui X. Pulse waveform characterization by electro-optic sampling at NIM // 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2020. P. 1–2. DOI: 10.1109/CPEM49742.2020.9191721.
4. Lauffenburger S. Characterization of microwave Gallium Arsenide integrated circuits with electro-optic probing using a continuous laser beam: thesis / Stefan Lauffenburger; École Nationale Supérieure des Télécommunications. 2004. 156 p.

УДК 621.317 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.450.454

# Эталон единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур на пластине

## On-wafer Standard of Units of Reflection and Transmission Coefficients

**Бондаренко А. С.[1], Боровков А. С.[1,2], Малай И. М.[1], Семёнов В. А.[1]**
*[1] ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»*
*141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, Менделеево*
*bondarenko@vniiftri.ru, borovkov@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, smnv@vniiftri.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Bondarenko A. S.[1], Borovkov A. S.[1,2], Malay I. M.[1], Semyonov V. A.[1]**
*[1] The Federal State Unitary Enterprise "Russian metrological institute of technical physics and radio engineering"*
*Mendeleevo, Moscow region, 141570, Russia*
*bondarenko@vniiftri.ru, borovkov@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, smnv@vniiftri.ru*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Показана необходимость разработки системы метрологического обеспечения измерений комплексных коэффициентов отражения и передачи современных и перспективных изделий СВЧ-микроэлектроники на пластине в ходе их разработки, испытаний и производства. Предложена схема метрологической прослеживаемости единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур, реализованных на пластине, к единицам существующих эталонов. Определен состав разрабатываемого эталона.
**Ключевые слова:** измерения на пластине; метрологическая прослеживаемость измерений; векторный анализатор цепей; зондовая станция; калибровочная пластина; копланарная линия передачи.

The paper highlights necessity of developing metrological support system for on-wafer measuring reflection and transmission coefficients of modern and promising microwave microelectronic products in the course of their development, testing and production. Besides, it offers a metrological traceability scheme of units of reflection and transmission coefficients in microelectronic on-wafer structures to units of existing standards, as well as determines the composition of the on-wafer standard being developed.
**Keywords:** on-wafer measuring; measurement metrological traceability; vector network analyzer; probe station; calibration substrate; coplanar transmission line.

Разработка современных радиотехнических устройств для обеспечения связи, безопасности и охраны здоровья невозможна без применения изделий микроэлектроники. Контроль качества продукции, выпускаемой отечественными предприятиями микроэлектроники, — важнейший этап производства, при котором проводится определение значений основных радиотехнических параметров, таких как комплексные коэффициенты отражения (КО) и передачи (КП). Для этого

используются установки, которые состоят из векторного анализатора цепей и зондовой станции. В настоящее время отечественными предприятиями эксплуатируются зондовые станции преимущественно зарубежного производства. Данное оборудование метрологически не обеспечено в эксплуатации в России. Результаты измерений характеристик производимых изделий на разных измерительных установках могут различаться.

Повышение достоверности результатов измерений и, как следствие, качества выпускаемой продукции может быть достигнуто обеспечением единства измерений КО и КП современных и перспективных изделий СВЧ-микроэлектроники на пластине в ходе их разработки, испытаний и производства. Поэтому создание соответствующего специального эталона для зондовых измерений КО и КП микроэлектронных структур на пластине является приоритетной и актуальной задачей.

В основе разрабатываемого эталона, как и в эталонах единиц КО и КП в коаксиальных и волноводных трактах, предлагается использовать метод сравнения с мерой [1]. Векторный анализатор цепей совместно с зондовой станцией используется как компаратор, а меры из набора для проведения калибровки типа TRL [2] представляют собой отрезки копланарных линий передачи. Метрологическая прослеживаемость измерений КО и КП обеспечивается к эталонам величин в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. В настоящее время актуальной задачей является установление единых подходов к определению метрологических характеристик эталонных мер и способов передачи единиц КО и КП конечному потребителю.

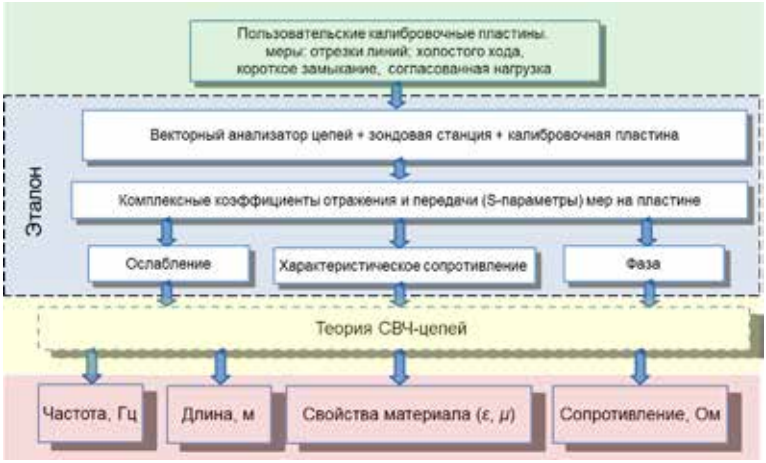



**Рис. 1.** Метрологическая прослеживаемость измерений КО и КП микроэлектронных структур на пластине

Методики определения действительных значений калибровочных мер, реализованных на подложке, включают операции расчета с применением известных моделей, таких как квазистатическая модель копланарной линии [3], квазианалитическая модель Беркеля [4, 5], аналитическая модель Вольфганга Хайнриха [6],

параметрическое электромагнитное моделирование в специальных программных пакетах, таких как CST, HFSS, Microwave Office и т.п. Входными параметрами этих моделей являются: ширины центрального проводника и промежутков между центральным и боковыми проводниками, длина линии, толщины проводников и подложки, относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки, удельное сопротивление и погонные емкость и индуктивность проводников. В результате рассчитываются: характеристический импеданс линии в рабочем диапазоне частот, электрическая длина, фазочастотная характеристика и погонное ослабление. Этого достаточно для определения S-параметров копланарной линии.

Общепринятой и признанной ведущими метрологическими институтами мира, такими как PTB, NPL и NIST, является модель Хайнриха [6]. Она была использована при создании эталонной пластины NIST, а также рекомендована консорциумом PlanarCal [7] как математический аппарат для обеспечения метрологической прослеживаемости к существующим эталонам. В целях обеспечения единства измерений эту модель также планируется использовать для расчета действительных характеристик копланарных линий разрабатываемого эталона. Передача единицы КО и КП осуществляется измерением S-параметров мер, реализованных на пользовательских пластинах, посредством векторного анализатора цепей в соответствии с моделью, представленной в [2].

Таким образом, эталон должен состоять из векторного анализатора цепей, зондовой станции, оснащенной соответствующими тестируемой линии зондами, и калибровочных пластин, а также средств измерений линейно-угловых величин, диэлектрической проницаемости, поверхностного сопротивления. В качестве мер на пластине предполагается использовать изделия отечественного производства.

***Литература***


1. Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Семёнов В. А. Методика определения метрологических характеристик эталонных мер единицы комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах миллиметрового диапазона длин волн // Измерительная техника, 2020. — № 1. — С. 58–62.
2. Губа В. Г., Ладур А. А., Савин А. А. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей // Сборник докладов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Томск: ТУСУР, 2011. — № 2 (24). — Ч. 1. — С. 149–155.
3. Якушев И. Ю. Анализ однослойных и многослойных копланарных полосковых линий и волноводов // Вестник СибГУТИ, 2017. — № 4. — С. 73–83.
4. van Berkel S. L. et al. A quasi-analytical tool for the characterization of transmission lines at high frequencies [EM programmer's notebook] // IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016. Vol. 58. № 3. P. 82–90.
5. van Berkel S. L. Characterization of printed transmission lines at high frequencies. 2015.
6. Heinrich W. Quasi-TEM descriprion of MMIC coplanar lines including conductor-loss effects // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 41. № 1. Jan. 1993. P. 45–52.
7. Uwe Arz, Karsten Kuhlmann, Thorsten Dziomba, Gerd Hechtfischer, Gia Ngoc Phung, Franz Josef Schmückle and Wolfgang Heinrich. Traceable Coplanar Waveguide Calibrations on Fused Silica Substrates up to 110 GHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019. Vol. 67 (6). P. 2423–2432.

***References***

1. Bondarenko A. S., Borovkov A. S., Malay I. M., Semyonov V. A. Method for Assessing the Metrological Characteristics of Reference Measures of a Unit of the Complex Reflection Coefficient in Waveguides in the Millimeter Wavelength Range. Measurement Techniques, 2020. Vol. 63. № 1. P. 59–64. DOI: 10.1007/s11018-020-01750-y.
2. Guba V. G., Ladur A. A., Savin A. A. Klassifikatsiya i analiz metodov kalibrovki vektornykh analizatorov tsepei // Sbornik dokladov Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioehlektroniki. Tomsk: TUSUR, 2011. № 2 (24). CH. 1. P. 149–155.
3. Yakushev I. Yu. Analiz odnosloinykh i mnogosloinykh koplanarnykh poloskovykh linii i volnovodov // Vestnik SiBGUTI, 2017. № 4. P. 73–83.
4. van Berkel S. L. et al. A quasi-analytical tool for the characterization of transmission lines at high frequencies [EM programmer's notebook] // IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016. Vol. 58. № 3. P. 82–90.
5. van Berkel S. L. Characterization of printed transmission lines at high frequencies, 2015.
6. Heinrich W. Quasi-TEM descriprion of MMIC coplanar lines including conductor-loss effects // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 41. № 1. Jan. 1993. P. 45–52. DOI:10.1109/22.210228.
7. Uwe Arz, Karsten Kuhlmann, Thorsten Dziomba, Gerd Hechtfischer, Gia Ngoc Phung, Franz Josef Schmückle and Wolfgang Heinrich. Traceable Coplanar Waveguide Calibrations on Fused Silica Substrates up to 110 GHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019. Vol. 67 (6). P. 2423–2432. DOI:10.1109/TMTT.2019.2908857.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.454.455

# Современные средства измерений FORMULA для контроля статических параметров полупроводниковых приборов, в том числе СВЧ-транзисторов

## Modern Measuring Instruments FORMULA to Control the Static Parameters of Semiconductor Devices, Including SHF-transistors

**Шор О. Ю., Шустров А. В.**
*ООО «ФОРМ»*
*119530, г. Москва, Очаковское ш., 34, этаж 1, пом. I, комната 16*
*info@form.ru*

**Shor O. Yu., Shustrov A. V.**
*FORM Co. Ltd*
*34 Ochakovskoe Ave., Moscow, 119530, Russia*
*info@form.ru*

Разработана универсальная контрольно-измерительная система «Тестер FORMULA TT3» для комплексной автоматизированной проверки статических параметров полупроводниковых приборов, в том числе СВЧ-транзисторов, в корпусе и на пластине. Отмечены основные технические характеристики и функциональные возможности тестера. Показаны преимущества применения тестера FORMULA TT3 на этапах разработки, производства, испытаний и входного контроля ЭКБ.

**Ключевые слова:** контрольно-измерительное оборудование; полупроводниковые приборы; измерение энергии лавинного пробоя; измерение зарядовых и емкостных характеристик.

На сегодняшний день оборонно-промышленный комплекс России нуждается в высокоавтоматизированных контрольно-измерительных системах, учитывающих требования метрологического законодательства РФ и нормативной документации в области измерений и испытаний в микроэлектронике.

Разработанная контрольно-измерительная система «Тестер FORMULA TT3» (далее — тестер FORMULA TT3) гарантирует полное метрологическое соответствие заявленных характеристик и позволяет:

- программировать параметры входных воздействий на объект контроля (транзисторов, диодов, стабилитронов, тиристоров, оптопар, диодных и транзисторных сборок) по длительности и напряжению/тока до 2 кВ/100 А на пластине и в корпусе;
- измерять в диапазоне малых токов от 100 пА;
- измерять емкостные характеристики полевых транзисторов в диапазоне от 30 пФ до 40 нФ;
- измерять зарядовые характеристики полевых транзисторов в диапазоне от 1 до 400 нК;
- проводить испытания полевых транзисторов энергией лавинного пробоя;

- измерять мощные транзисторы в короткоимпульсном (от 300 мкс) режиме, исключающем необходимость организации технически сложного теплоотвода с объекта контроля;
- исследовать объект контроля со снятием вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик;
- контролировать транзисторные и диодные сборки в мультикристальном режиме;
- проводить автоматическую диагностику и калибровку тестера, автоматическое формирование протоколов поверки.

Аппаратно-программные и конструкторские решения, реализованные в тестере FORMULA TT3, учитывают современные потребности электронной промышленности России при измерении полупроводниковых приборов, включая измерение статических параметров СВЧ-транзисторов.

Тестер FORMULA TT3 обеспечивает:

- высокий уровень комплексной автоматизации всех этапов процесса измерений;
- расширенный диапазон контроля и число методов измерений полупроводниковых приборов;
- высокую точность и достоверность результатов;
- интеграцию с зондовыми автоматами, автозагрузчиками, испытательным оборудованием;
- надежность в круглосуточном режиме работы;
- встроенную в ПО библиотеку из 72 нормативных методов контроля полупроводниковых приборов.

Тестер FORMULA TT3 разработан высококвалифицированными специалистами ООО «ФОРМ» на основе лучших мировых практик в измерениях, испытаниях и метрологии и является продукцией, произведенной на территории Российской Федерации.

***Литература***

1. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. — Введ 01.01.1996.
2. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.12.2019 № 3457 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы».
3. ФРМИ.411734.004 ТУ. Системы контрольно-измерительные. Тестеры полупроводниковых приборов FORMULA TT3. Технические условия.

УДК 621.375.026 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.456.459

# Концепция организации СВЧ-измерений параметров GaAs МИС-усилителей мощности до 40 ГГц на зондовой станции в серийном производстве. Проблемы и пути их решения

## The Concept of Organizing Microwave Measurements of the Parameters of Power Amplifiers up to 40 GHz at the Probe Station in Serial Production. Problems and Ways to Solve them

**Воеводин А. А.**[1]
*[1] АО «Научно-производственная фирма «Микран»*
*634043, г. Томск, пр. Кирова, 51д*
*alv@micran.ru*

**Voevodin A. A.**[1]
*[1] Micran Research and Production Company JSC*
*51d Kirova Ave., Tomsk, 634043, Russia*
*alv@micran.ru*

В данной работе представлены основные подходы к организации рабочего места по финальному СВЧ-контролю параметров МИС-усилителей мощности (далее МИС УМ) до 40 ГГц на пластинах GaAs (4 и 6 дюймов) на базе полуавтоматической зондовой станции как на стадии прототипирования изделия, так и при постановке в мелкосерийное производство.
**Ключевые слова:** СВЧ электроника; монолитная интегральная схема СВЧ-диапазона частот; усилитель мощности; зондовая станция; арсенид галлия; электронная компонентная база.

This paper presents the main approaches to the organization of a workplace for the final microwave control of the parameters of MMIC power amplifiers up to 40 GHz on GaAs plates (4 and 6 inches) based on a semi-automatic probe station both at the stage of prototyping the product and when setting up a small-scale production.
**Keywords:** microwave electronics; monolithic integrated circuit of microwave frequency range; amplifier; probe station; gallium arsenide; electronic component base.

Одним из важных этапов технологического маршрута изготовления монолитных интегральных схем (МИС) усилителя мощности является финишный контроль электрических параметров на полупроводниковой пластине. На данном этапе происходит не только отбраковка негодной продукции, но и оценка качества технологии путем обработки и анализа результатов измерений. Разработчикам необходимо иметь обратную связь от участка финишного контроля для возможности внесения изменений в технологические операции, чтобы повысить качество изготавливаемой продукции.

Особое внимание следует уделить измерениям МИС УМ СВЧ-диапазона. Измерения на СВЧ в общем случае представляют собой нетривиальную задачу. Сложность связана со спецификой устройств СВЧ-диапазона, дороговизной оборудования и аксессуаров измерительного тракта. Практически для каждого типа МИС УМ требуются уникальный измерительный тракт и своя методика измерений параметров.

В промышленном масштабе производства МИС на неразделенной полупроводниковой пластине их количество может достигать нескольких десятков тысяч. Для проведения измерений электрических параметров всех МИС применяют автоматизированные зондовые методы, направленные на повышение качества и сокращение времени измерений.

На этапе прототипирования необходимо в первую очередь получить информацию о работоспособности МИС УМ относительно предъявляемых требований по ТЗ на микросхему. Для этого необходимо организовать рабочее место для проведения СВЧ-измерений расширенного количества параметров всех 100 % МИС УМ на пластине в целях получения статистической информации распределения набора измеренных параметров по пластине. На этапе мелкосерийного производства МИС УМ необходимо создать рабочее место на базе набора контрольно-измерительного оборудования, полуавтоматической зондовой станции, согласованных с заказчиком методик измерений. При мелкосерийном производстве в целях ускорения получения результатов измерений применяют чаще всего измерения основных СВЧ/НЧ-параметров микросхемы УМ.

В данном докладе будут охвачены следующие вопросы:

- способы организации СВЧ-измерений МИС УМ на зондовой станции при контроле малосигнальных параметров;
- способы организации СВЧ-измерений УМ на зондовой станции при контроле динамических характеристик;
- минимальное необходимое контрольно-измерительное оборудование и требования к данному оборудованию;
- необходимые аксессуары СВЧ/НЧ-тракта для подключения контрольно-измерительного оборудования к зондовой станции при измерении малосигнальных и динамических характеристик УМ;
- необходимые аксессуары для полуавтоматической зондовой станции: возможные проблемы на этапе разработки и пути их решения;
- возможные проблемы при первичных измерениях параметров УМ и пути их решения;
- программное обеспечение (ПО) для проведения измерений: варианты реализации;
- программное обеспечение (ПО) для анализа измеренных данных: варианты реализации;
- будут представлены рабочие места измерения параметров УМ на зондовой станции в АО «НПФ Микран»;
- зарубежный опыт организации аналогичных измерений у foundry-компаний (OMMIC, UMS и др.).

Разработанные концепции СВЧ-измерений на зондовой станции могут быть успешно использованы при серийном производстве микросхемы усилителей мощности.

***Литература***

1. John L. B. Walker. High-Power GaAs FET Amplifiers. Artech House Boston, London, 1996.
2. Teppati V., Ferrero A., Sayed M. Modern RF and Microwave Measurement Techniques. Cambridge University Press, 2013.

One of the important stages of the technological route of manufacturing monolithic integrated circuits (MMIC) of a power amplifier is the final control of electrical parameters on a semiconductor wafer. At this stage, not only rejection of unsuitable products takes place, but also an assessment of the quality of technology by processing and analyzing the measurement results. Developers need to have feedback from the finishing area to be able to make changes to manufacturing operations to improve the quality of their products.

Particular attention should be paid to the measurements of the MMIC of the microwave range. Microwave measurements are generally a nontrivial problem. The complexity is associated with the specifics of microwave devices, high cost of equipment and accessories of the measuring path. Almost every type of MMIC power amplifiers requires a unique measuring path and its own method for measuring parameters.

On an industrial scale, the production of MMIC, on an undivided semiconductor wafer, their number can reach several tens of thousands. To measure the electrical parameters of all MMICs, automated probe methods are used to improve the quality and shorten the measurement time.

At the stage of prototyping, it is necessary, first of all, to obtain information about the operability of the MMIC power amplifier regarding the requirements for technical specifications for a microcircuit. To do this, it is necessary to organize a workplace for microwave measurements of an extended number of parameters of all 100 % MMIC power amplifier on a plate in order to obtain statistical information on the distribution of a set of measured parameters over the plate. At the stage of small-scale production of the MMIC power amplifier, it is necessary to create a workplace based on a set of control and measuring equipment, a semi-automatic probe station, and measurement procedures agreed with the customer. In small-scale production, in order to accelerate the acquisition of measurement results, measurements of the main microwave/low-frequency parameters of the power amplifier microcircuit are most often used.

This report will cover the following issues:

- methods of organizing microwave measurements of the MMIC power amplifier at the probe station while monitoring small-signal parameters;
- ways of organizing microwave measurements of the power amplifier at the probe station while monitoring the dynamic characteristics;
- the minimum required instrumentation and requirements for this equipment;
- the necessary accessories of the microwave/low frequency path for connecting control and measuring equipment to the probe station when measuring low-signal and dynamic characteristics of the power amplifier;
- necessary accessories for a semi-automatic probe station: possible problems at the development stage and ways to solve them;
- possible problems during primary measurements of the power amplifier parameters and ways to solve them;
- software for measurements: implementation options;
- software for the analysis of measured data: implementation options;
- workplaces for measuring power amplifier parameters at the probe station in Micran NPF JSC will be presented;
- foreign experience in organizing similar measurements at Founfry companies (OMMIC, UMS, etc.).

The developed concepts of microwave measurements at the probe station can be successfully used in the mass production of power amplifier microcircuits.

***References***

1. John L. B. Walker. High-Power GaAs FET Amplifiers // Artech House Boston, London, 1996.
2. Teppati V., Ferrero A., Sayed M. Modern RF and Microwave Measurement Techniques // Cambridge University Press, 2013.

УДК 621.375 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.460.462

# Малошумящий усилитель СВЧ-диапазона в исполнении системы в корпусе по технологии LTCC

## Low-noise Amplifier of the Microwave Range Implemented as a System in Package Using LTCC Technology

**Ворожцов А. Л., Петренко И. М., Юст П. А.**
*Центральное конструкторское бюро автоматики*
*644027, Омск*
*alek.vorog@yandex.ru*

**Vorozhtsov A. L., Petrenko I. M., Yust P. A.**
*"Central Design Bureau of Automation" JSC*
*Omsk, 644027*
*alek.vorog@yandex.ru*

Статья посвящена созданию малошумящего СВЧ-усилителя, реализованного в исполнении «система в корпусе», с использованием кристаллов усилителя с распределенным усилением и ступенчатого аттенюатора, установленных в LTCC-модуль.
**Ключевые слова:** система в корпусе; технология LTCC; малошумящий усилитель.

The article is devoted to the creation of a low-noise microwave amplifier, implemented as a "system in package", using distributed gain amplifier crystals and a step attenuator installed in the LTCC module.
**Keywords:** system in package; LTCC technology; low-noise amplifier.

Актуальной задачей сегодня является создание миниатюрных СВЧ интегральных модулей малошумящих усилителей (МШУ) с регулируемым коэффициентом усиления. В зависимости от требований по назначению оптимальным решением для подобных МШУ может стать исполнение «система в корпусе» (СвК, англ.: SiP — System in Package). СвК — это комбинация из нескольких кристаллов монолитных интегральных схем (МИС) и пассивных радиокомпонентов различной функциональности.

Разработка конструкции СвК МШУ была ориентирована на применение многослойной технологии LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic — низкотемпературная совместно обжигаемая керамика). Это дает возможность не только получить миниатюрную конструкцию, допускающую ее применение в микроэлектронном устройстве с общей герметизацией, но и установить СвК МШУ непосредственно на печатную плату как элемент для поверхностного монтажа, при этом защита кристалла обеспечивается размещением кристаллов МИС в полостях LTCC-модуля с применением методов локальной герметизации.

В состав СвК МШУ вошли изготовленные на фабрике Win Semiconductor (Тайвань) кристаллы входного усилителя, аттенюатора и выходного усилителя, а также пассивные элементы. Усилители реализованы на кристаллах МИС усилителя с распределенным усилением с диапазоном рабочих частот 0,9–18 ГГц. Регулировку

коэффициента усиления обеспечивал кристалл МИС аттенюатора, содержащий четыре ячейки с затуханием 0,75, 1,5, 3 и 6 дБ. Кристаллы МИС разработаны специалистами ЗАО «ЦеНТР» г. Санкт-Петербург.

На рис. 1 приведена фотография СвК МШУ в устройстве контроля, а на рис. 2 и 3 — результаты измерений ее амплитудной, амплитудно-частотной и шумовой характеристик.

Полученная неравномерность АЧХ СвК МШУ в 6 дБ обусловлена неравномерностью АЧХ входящих двух кристаллов УРУ (2,5 дБ каждый) и аттенюатора (1,5 дБ).

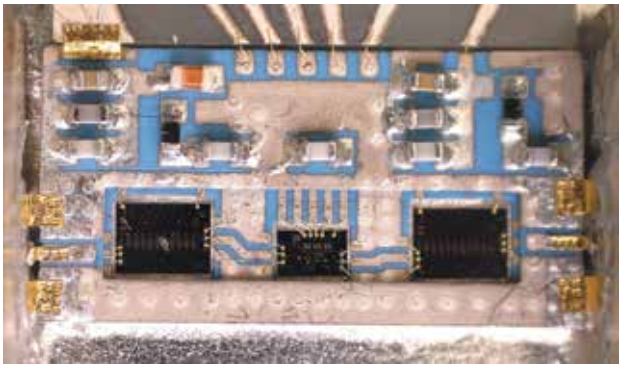


**Рис. 1.** Внешний вид изготовленной СвК МШУ (14×7×1 мм$^3$) в устройстве подключения

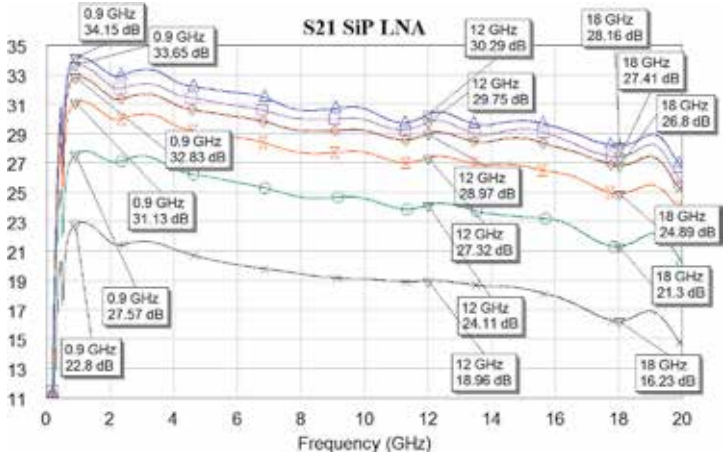



**Рис. 2.** График АЧХ СвК МШУ при разных уровнях ослабления на аттенюаторе (0/0,75/1,5/3/6/11,25 дБ)

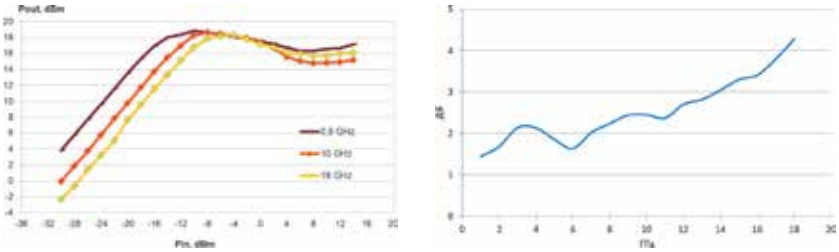



**Рис. 3.** График амплитудной характеристики СвК МШУ на частотах 0,9, 10 и 18 ГГц (слева) и коэффициента шума (справа)

Разработанный сверхширокополосный малошумящий усилитель СВЧ-диапазона с регулируемым коэффициентом усиления в исполнении «система в корпусе» показал очень хорошее совпадение результатов моделирования и измерений изготовленных образцов. Применение таких решений, как система в корпусе на базе многослойной керамики и кристаллов МИС, открывает новые возможности в реализации миниатюрных интегральных модулей СВЧ.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.463

# Биполярная микросхема высоковольтного драйвера с защитой от перегрузок для управления pin-диодами

## Bipolar High Voltage Driver Microchip with Overload Protection to Control PIN-diodes

**Дик П. А., Волков И. Н., Кучерский В. Р.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*

**Dik P. A., Volkov I. N., Kucherskiy V. R.**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*

Представлены результаты разработки микросхемы высоковольтного драйвера для управления мощными аттенюаторами и фазовращателями.
**Ключевые слова:** высоковольтный драйвер; интегральная микросхема; защита от перегрузок; переключательные p-i-n-диоды.

Разработана четырехканальная микросхема управления мощными коммутаторами СВЧ-сигналов для АФАР. Микросхема изготовлена по 60-вольтовой биполярной комплементарной технологии с изолирующими p-n-переходами и выполнена в металлокерамическом корпусе 4112.16-3. Микросхема формирует двухполярные импульсы с амплитудой до 55 В и с выходным импульсным током до 2 А. При разработке микросхемы учтен опыт использования микросхем серии 1312 [1] в составе серийной радиолокационной аппаратуры, в частности принято решение о применении защиты от перегрузок и перегрева.

Защита от перегрузок основана не на ограничении выходного импульсного тока, а на ограничении времени работы в режиме КЗ, поскольку в штатном режиме драйвер диодной нагрузки работает на КЗ в течение времени восстановления обратного сопротивления диода. Схема защиты использует техническое решение, изложенное в патенте РФ [2].

Защита от перегрева исключает катастрофические отказы, вызванные программными сбоями, которые могут приводить к резкому увеличению частоты повторения импульсов управления и разогреву микросхемы. В этой ситуации срабатывает температурная защита.

***Литература***

1. Волков И. Н., Дик П. А., Кучерский В. Р., Машкова В. С. Интегральные схемы управления коммутаторами СВЧ-сигналов на p-i-n-диодах. Твердотельная электроника. СФ-блоки РЭА // Материалы научно-технической конференции — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2008. — 60 с.
2. Пат. 2547616 РФ. Интегральная схема задержки включения / П. А. Дик, Т. А. Дик, А. А. Евстигнеев. — МПК H03K 5/01, опуб. 04.10.15.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.464.465

# Биполярные микросхемы драйверов с гальванической развязкой для управления силовыми транзисторами

## Bipolar Driver Microchips with Galvanic Separation to Control the Power Transistors

**Дик П. А., Ванюшкин А. В., Крымко М. М., Кучерский В. Р.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*

**Dik P. A., Vanyushkin A. V., Krymko M. M., Kucherskiy V. R.**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*

В работе представлены особенности проектирования биполярной интегральной схемы драйверов с гальванической развязкой.
**Ключевые слова:** верхний ключ; силовая электроника; гальваническая развязка; интегральная микросхема.

Силовая электроника — активно развивающаяся отрасль техники. Прогресс в развитии силовых транзисторов с изолированным затвором обеспечивает их широкое применение в различных устройствах силовой электроники, включая источники питания, системы управления двигателями, устройства защиты и коммутации.

Важным элементом силовой электроники являются драйверы, т.е. схемы управления затвором. Различают драйверы нижнего и драйверы верхнего ключа. Особенность драйвера верхнего ключа заключается в наличии плавающего питания и необходимости согласования с источником цифрового сигнала. Известны различные способы управления верхним ключом [1]. Наиболее удобными являются драйверы с гальванической развязкой. Вероятно, самый распространенный элемент гальванической развязки — оптрон. Однако в работе [2] показано, что более перспективны схемы с гальванической развязкой на основе емкостного барьера.

В данной работе рассматриваются варианты схемотехнического построения драйверов с гальванической развязкой с конденсаторами связи. В качестве технологии выбрана биполярная комплементарная 15-вольтовая технология с щелевой изоляцией, используемая при производстве быстродействующих компараторов напряжения серии 1481. Выбор продиктован следующими соображениями: во-первых, технология позволяет реализовать вертикальные n-p-n и p-n-p высокочастотные транзисторы с fT 3–4 и 1,5–2 ГГц соответственно; во-вторых, малые размеры транзисторов (ширина эмиттера ~1,5 мкм) в совокупности с щелевой изоляцией обеспечивает реализацию быстродействующих схем с весьма малыми токами потребления — из-за малых паразитных емкостей структур; в-третьих, специальными схемотехническими приемами достигается рабочее напряжение кристаллов до 18–22 В, что вполне достаточно для создания драйверов современных силовых транзисторов. Важно заметить, что данная технология обеспечивает высокий уровень стойкости к СВФ.

Принцип работы драйвера с гальванической развязкой заключается в следующем. Одноканальный драйвер состоит из двух отдельных кристаллов — цифрового и силового, которые располагаются на изолирующем основании корпуса на некотором расстоянии друг от друга. Связь между кристаллами осуществляется через конденсаторы, размещенные непосредственно на кристаллах. На цифровом кристалле импульсный сигнал управления преобразуется в парафазные высокочастотные пачки импульсов. Через конденсаторы связи импульсы подаются на дифференциальный усилитель на силовом кристалле и далее преобразуются в исходные импульсы управления драйвером. Силовой кристалл питается от плавающего источника питания.

Чем выше частота ВЧ-заполнения, тем меньше может быть емкость связи и тем выше качество гальванической развязки. Выбранная технология обеспечивает частоту >100 МГц при токе потребления цифрового кристалла 2–3 мА; емкость может быть $\lesssim$1 пФ. Уменьшение емкости важно еще по одной причине: во время переключения силового транзистора происходит быстрый синфазный перезаряд конденсаторов связи и ток перезаряда может достигать десятков миллиампер, вызывая ложные переключения драйвера. Отсюда вытекают ограничения на максимальную допустимую скорость переключения dU/dt.

Современные драйверы с гальванической развязкой на емкостном барьере имеют рабочее напряжение изоляции >5 кВ. Для этого созданы технологии формирования диэлектрика со стабильными параметрами. В данной работе предложена конфигурация схемы, обеспечивающая — без каких-либо специальных технологических операций — напряжение изоляции до 800 В. Обкладки высоковольтных конденсаторов выполнены металлами двухуровневой металлизации со стандартным межслойным диэлектриком. Повышение напряжения достигается последовательным соединением двух конденсаторов — на цифровом и на силовом кристаллах.

Экспериментальные образцы драйверов имеют импульсные выходные токи порядка 2 А при статической мощности потребления 150–200 мВт; задержка включения/выключения составляет 90/250 нс. Рассмотрен способ уменьшения обеих задержек до 50–80 нс.

***Литература***

1. Стерзик К., Голубев И. Надежность и устойчивость гальванической развязки цифровых сигналов // Компоненты и технологии, 2007. — № 2.
2. Изолированные драйверы затворов транзисторовв. URL: www.analog.com/ru/products/interface-isolation/isolation/isolated-gate-drivers.html.

УДК 621.316.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.466.468

# Силовой интеллектуальный ключ с повышенными эксплуатационными характеристиками

## Intelligent Power Key with Increased Performance Characteristics

**Крымко М. М., Максимов А. Н., Дик П. А., Краснов А. А., Ледовских А. П., Кибирев Н. С.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*
*k.n978@yandex.ru*

**Krymko M. M., Maksimov A. N., Dik P. A., Krasnov A. A., Ledovskikh A. P., Kibirev N. S.**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*
*k.n978@yandex.ru*

В работе представлены особенности проектирования силового интеллектуального ключа в металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа.
**Ключевые слова:** нижний ключ; силовая электроника; интеллектуальный ключ.

Работа интеллектуальных ключей основана на основных свойствах транзисторов. Например, ключи МОП-транзисторов работают следующим образом. При подаче на затвор транзистора сигнала низкого уровня («логический 0») относительно истока транзистор закрыт, ток через транзистор не идет, при этом на стоке транзистора будет все напряжение питания нагрузки. При подаче на затвор транзистора сигнала высокого уровня (логической 1) транзистор открывается и в цепи сток-исток возникает ток. Напряжение между стоком и истоком становится малым, при этом все напряжения питания нагрузки оказывается приложенным к нагрузке [1].

Как правило, кроме собственно ключевого элемента (МОП-транзистор), в него входит логический элемент управления — драйвер, включающий блок диагностики и схемы защиты от перегрузки по току и температуре. Микросхема драйвера позволяет осуществлять управление силовым транзистором с помощью микроконтроллера [2].

Структурная схема интеллектуального ключа 2628КИ01 показана на рис. 1.

В состав разработанного интеллектуального ключа 2628КИ01 входит следующий набор встроенных защитных функций:

- защита по перегрузке по току (отключение при превышении);
- защита от короткого замыкания (отключение при превышении);
- защита от перегрева (отключение при превышении);
- функция диагностики обрыва нагрузки.

Решением проблемы токовых перегрузок является датчик тока. Ток равномерно распределяется между всеми элементарными ячейками, поэтому, отделив некоторое количество элементарных ячеек и сделав от них отвод тока, можно, измеряя его величину, судить о полном токе, протекающем через транзистор [3, 4]. Защита интеллектуального ключа 2628КИ01 от перегрузки по току осуществляется компарированием опорного напряжения и напряжения снимаемого с датчика тока,

встроенного на кристалл транзистора. При превышении заданного уровня происходит его отключение, при этом отсутствует функция автовключения и необходимо на вход подать сигнал выключения длительностью 100 мкс, а потом сигнал повторного включения, выждав интервал времени сброса системы защиты Treset.

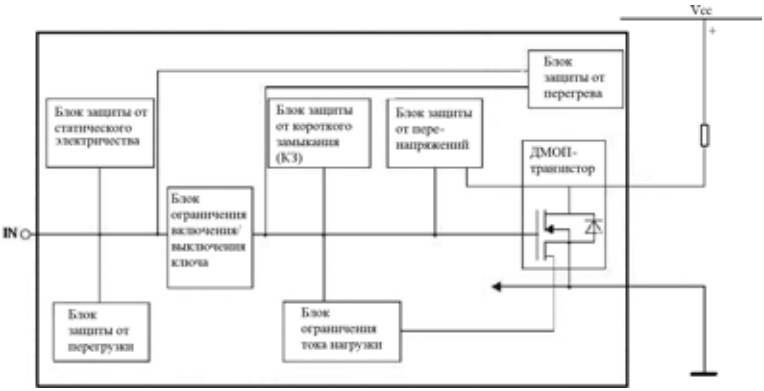



**Рис. 1.** Схема интеллектуального ключа 2628КИ01

Защита ключа от перегрева достигается его отключением, повторное включение возможно при его остывании до температуры 115 °С. Функция автовключения отсутствует, необходимо на вход подать сигнал выключения длительностью 100 мкс, а потом сигнал повторного включения, выждав интервал времени сброса системы защиты Treset.

Схема защиты от перегрузок интеллектуального ключа формирует на выходе напряжение статус-сигнала, формирование статус-сигнала при превышении допустимого тока показано на рис. 2.

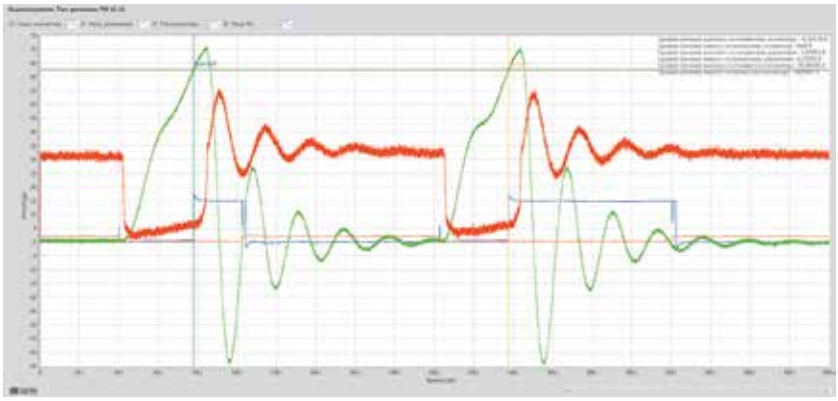


**Рис. 2.** График тока МОП-транзистора с защитой по току

Силовой интеллектуальный ключ нижнего уровня 2628КИ01 разработан с учетом жестких требований к внешним воздействующим факторам, температурный диапазон составляет от −60 до 125 °С. Импортным аналогом является ключ BTS149; основные параметры интеллектуального ключа 2628КИ01 представлены в табл. 1, изображение интеллектуального ключа представлено на рис. 3.

**Рис. 3.** Внешний вид интеллектуального ключа 2628КИ01

**Таблица 1.** Основные параметры интеллектуального ключа 2628КИ01

| | |
|---|---|
| Напряжение питания, В | 250 |
| Коммутируемый постоянный ток, А | 30 |
| Температурный диапазон, °С | −60...125 |
| Пороговый ток срабатывания защиты, А | 65 |
| Ограничение по току, А | 60 |
| Задержка включения $t_{Don}$, мкс | 200 |
| Задержка выключения, $t_{Doff}$, мкс | 200 |
| Сопротивление ключа в открытом состоянии, $R_{dson}$, Ом, T = 25 °С | 0,08 |

***Литература***

1. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Springer Science + Business Media. 2008. LLC P. 1069.
2. Семенов Э. Силовая электроника: от простого к сложному // М.: Солон-Перес, 2008.
3. Ishii H., Yong S., Pearce R. Использование МОП ПТ с датчиком тока в источниках питания с токовым управлением. — AN-961. IR.
4. Керенцев А. Конструктивно-технологические особенности MOSFET-транзисторов // Компоненты и технологии, 2007. — №4.

УДК 62-978.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.469.472

# Многокристальный модуль для построения повышающих или понижающих DC-DC-преобразователей напряжения

## Multi-chip Module for Design the Step up and Step-down DC-DC Voltage Converters

**Крымко М. М., Корнеев С. В., Шумков И. Е., Ростанин А. Н., Христьяновский А. Г.**
*АО «НПП «Пульсар»*
*105187, г. Москва, Окружной проезд, 27*
*rostanin_an@pulsarnpp.ru*

**Krymko M. M., Korneyev S. V., Shumkov I. Ye., Rostanin A. N., Khrist'yanovskiy A. G.**
*"Pulsar" Scientific and Production Enterprise JSC*
*27 Okruzhnoy Lane, Moscow, 105187*
*rostanin_an@pulsarnpp.ru*

Разработан высоконадежный радиационно- стойкий силовой модуль, предназначенный для построения понижающих или повышающих преобразователей напряжения.

**Ключевые слова:** модуль; преобразователь напряжения.

Разработанный твердотельный силовой модуль понижающего/повышающего преобразователя предназначен для создания однотактных DC-DC-преобразователей напряжения. Электрическая схема модуля приведена на рис. 1.

В состав модуля входят:

- микросхема высоковольтного полумостового драйвера (DA1);
- ключевой МОП-транзистор (VT1);
- диод Шоттки (VD3).

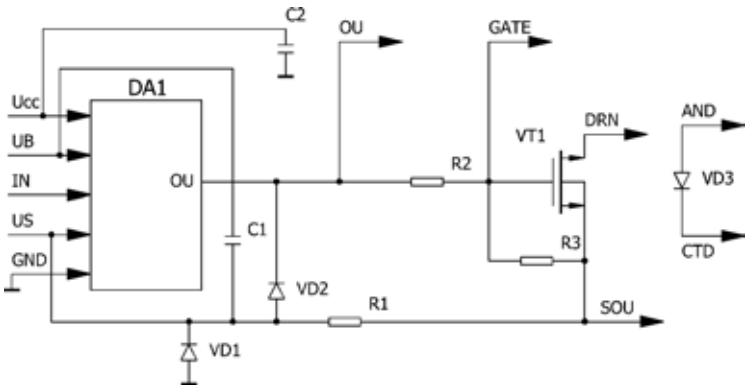



**Рис. 1**

Наличие плавающего источника питания (UB) микросхемы драйвера позволяет управлять транзистором VT1, включенным по схеме как нижнего, так и верхнего ключа. Для открытия ключа на его затвор подается напряжение на Uзи = 12–15 В. Величина напряжения Uзи определяется напряжением между выводами UB и US микросхемы драйвера.

Все компоненты модуля монтируются в компактный металлокерамический корпус с низким тепловым сопротивлением для поверхностного монтажа. Габариты корпуса — 29×39×4,64 мм. Фотография модуля приведена на рис. 2.

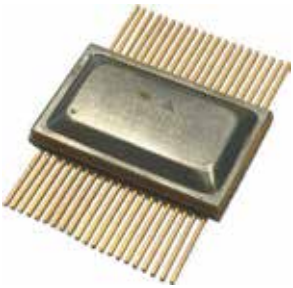


**Рис. 2**

Основные электрические характеристики приведены в табл. 1.

**Табл. 1**

| Обозн. | Наименование, ед. изм. (режим измерения) | Значение, не более |
|---|---|---|
| $R_{DSON}$ | Сопротивление в открытом состоянии, мОм ($U_{CC} = U_{BS} = 12$ В) | 90 |
| $U_F$ | Прямое падение напряжения на диоде, В ($I_F = 25$ А) | 1,4 |
| $I_R$ | Обратный ток диода, мА ($U_{CA} = 200$ В) | 0,6 |
| $t_{RR}$ | Время обратного восстановления диода, нс ($I_F = 25$ А, $U_R = 1000$ В) | 100 |
| $Q_{RR}$ | Заряд обратного восстановления диода, нК ($I_F = 25$ А, $U_R = 100$ В) | 500 |
| $t_{ON}$ | Время задержки вкл., нс ($U_{DD} = 4,5$ В, $U_{CC} = U_{BS} = 12$ В) | 350 |
| $t_{OFF}$ | Время задержки выкл., нс ($U_{DD} = 4,5$ В, $U_{CC} = U_{BS} = 12$ В) | 350 |
| $t_R$ | Время нарастания вых. напряжения, нс ($U_{DD} = 4,5$ В, $U_{CC} = U_{BS} = 12$ В, $C_L = 1$ нФ) | 90 |
| $t_F$ | Время спада вых. напряжения, нс ($U_{DD} = 4,5$ В, $U_{CC} = U_{BS} = 12$ В, $C_L = 1$ нФ) | 90 |

Схема включения модуля в режиме повышающего преобразователя приведена на рис. 3. Модуль управляется сигналом с ШИМ-генератора DA2.

Выходной транзистор модуля VT1 включен по схеме нижнего ключа: исток транзистора заземлен, на вход UB поступает напряжение UCC. Силовой диод VD3 включен между стоком транзистора и нагрузкой. К точке соединения диода и транзистора подключена индуктивность L1. Преобразованное напряжение формируется на конденсаторе C1, к которому подключена нагрузка. Резисторы R3–R4 задают обратную связь, позволяющую регулировать параметры ШИМ-сигнала.

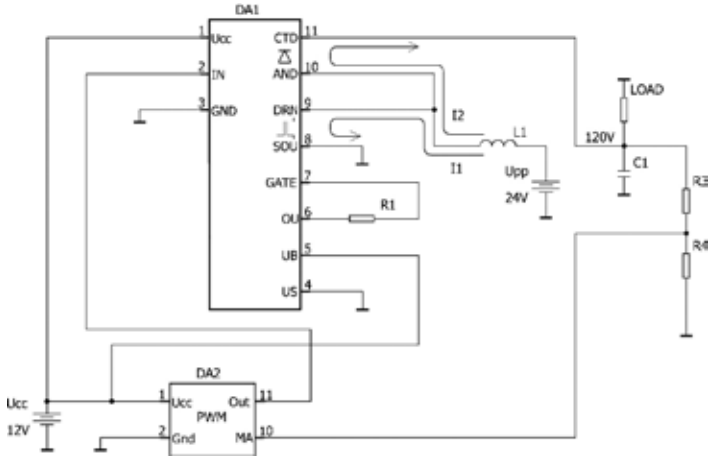



**Рис. 3**

Выходное напряжение на нагрузке составляет $V_{C1} = \frac{V_{PP}}{1-D}$, где $D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}$ — скважность сигнала на затворе транзистора ($t_{ON}$ — время, которое транзистор VT1 открыт, $t_{OFF}$ — время, которое транзистор VT1 закрыт), определяемая соотношением резисторов обратной связи R3/R4.

В режиме понижающего преобразователя выходной транзистор VT1 модуля включен по схеме верхнего ключа: сток транзистора (вывод DRN) подключен к источнику питания. Плавающий источник напряжения UBS подключен к источнику 12 В. Силовой диод VD3 включен между общим выводом и истоком транзистора. К точке соединения диода и транзистора подключена индуктивность L1. Преобразованное напряжение формируется на конденсаторе C1, к которому подключена нагрузка. Резисторы R3–R4 задают обратную связь. Схема включения модуля в режиме понижающего преобразователя приведена на рис. 4.

Выходное напряжение на нагрузке составляет $V_{C1} = V_{PP} x D$, где $D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}$ — скважность сигнала на затворе транзистора (tON — время, которое транзистор VT1 открыт, tOFF — время, которое транзистор VT1 закрыт), определяемая соотношением резисторов обратной связи R3/R4.

Проводилась оценка КПД повышающего преобразователя напряжения для различных значений тока и напряжений. Полученные значения КПД преобразователя находятся в диапазоне 95–97 %.

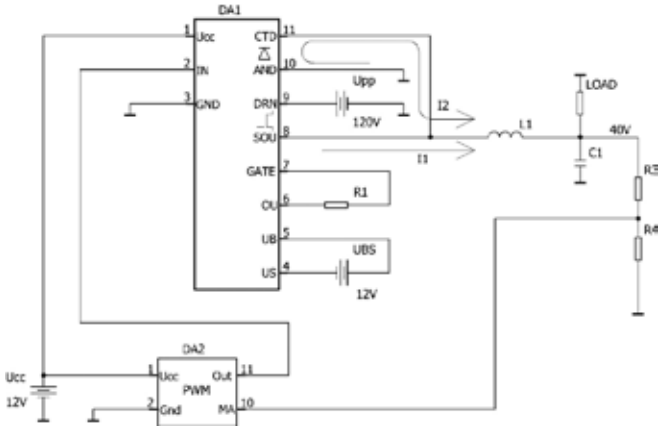



**Рис. 4.**

Преобразователь может работать как в непрерывном, так и прерывистом режиме. Однако для конкретного применения, как правило, выбирают один из этих двух режимов и соответствующим образом настраивают параметры схемы.

***Литература***

1. Крымко М. М., Корнеев С. В., Шумков И. Е. Научно-технический отчет по ОКР «Разработка и освоение серийного производства на отечественном предприятии радиационно-стойких силовых модулей понижающего/повышающего преобразователя на основе мощных полевых trench-транзисторов и высоковольтных драйверов в компактном металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа». — 2019. — С. 29–41.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.473.474

# Применение цифровой голографической микроскопии для контроля оптических элементов микросистем

## Application of Digital Holographic Microscopy to Control the Microsystems Optical Elements

**Минин М. Г., Шафоростов А. А., к. т. н.**
*ООО «Группа Ай-Эм-Си»*
*117638, г. Москва, ул. Криворожская, 23, корп. 3*
*sales@imc-systems.ru*

**Minin M. G., Shaforostov A. A., Ph.D**
*IMC Group Ltd*
*23/3 Krivorozhskaya St., Moscow, 117638*
*sales@imc-systems.ru*

Цифровая голографическая микроскопия является крайне эффективной технологией контроля поверхности микросистем (МЭМС), реализуемой в режиме реального времени и с высокими измерительными характеристиками. Измерительный принцип демонстрирует возможность измерений с частотой обновления изображения в режиме реального времени. Совокупность этих качеств позволяет считать технологию крайне перспективной при изучении поверхности микролинз бесконтактным способом.
**Ключевые слова:** цифровая голография; измерение поверхности; интерферометрия; профилометрия.

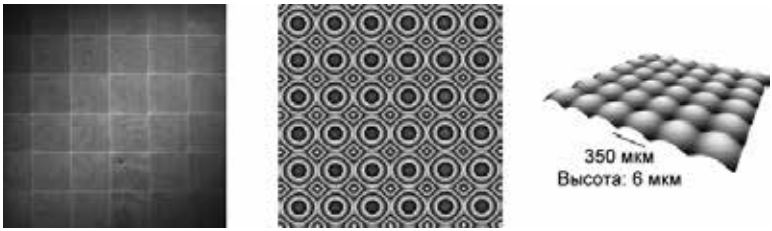
Технология цифровой голографии стала реальностью в начале девяностых годов XX века с началом применения устройств с программируемой зарядовой связью (ПЗС) в фоточувствительных матрицах видеокамер с размером минимального чувствительного элемента на уровне микрометров. Это обстоятельство позволило производить запись получаемой голограммы на электронный носитель информации и производить последующую обработку данных [1], тем самым фоточувствительные пластины, использовавшиеся ранее, стали не нужны, а процесс реконструкции изображения стал полностью программным.

Открытая таким образом возможность вычисления амплитуды и фазы отраженного света обеспечивает возможность получения субнанометровой разрешающей способности в определении топографии поверхности. В фокальной плоскости разрешающая способность остается зависимой от оптической схемы объектива и ограничена лишь дифракционным пределом и размером минимального чувствительного элемента (пикселя).

Более поздние исследования [2] продемонстрировали возможность использования стандартных объективов микроскопов для получения голограмм, что позволяет обеспечить значение латерального разрешения на уровне нескольких сотен нанометров в зависимости от численной апертуры объектива. Измерительный принцип демонстрирует возможность измерений с частотой обновления изображения в режиме реального времени.

Недавние исследования [3] свидетельствуют о том, что технология цифровой голографической микроскопии позволяет также компенсировать аберрации цифровым образом. Это обстоятельство представляет значительный интерес для изучения микролинз, поскольку, помимо получения данных о распределении фазы отраженного света по поверхности, технология позволяет легко определять коэффициенты полиномов Цернике с высокой точностью ($\lambda/100$), а также вычислять радиус кривизны поверхности. Учитывая возможность осуществлять измерения в режиме реального времени, контроль возможно проводить непосредственно на линии конвейера.

Методология процесса контроля позволяет также компенсировать формфактор, другими словами, «выровнять» асферические поверхности микролинз для измерения шероховатости. В работе Colomb et al. [3] рассматриваются некоторые применения голографической микроскопии для различных оптических компонентов, а именно сферических, цилиндрических и квадратных линз. Измеряемыми величинами при этом являются высота линзы, радиус кривизны, коэффициенты аберрации и шероховатость поверхности.




*а* *б* *в*

**Рис. 1.** Амплитуда отраженного света от массива микро-линз (*а*); фазовый контраст (*б*); трехмерная реконструкция голограммы МЭМС-элемента (*в*)

Поверхности таких микрообъектов, как дифракционные линзы Френеля и прозрачные и полупрозрачные уголковые отражатели, также могут быть исследованы с помощью голографии с использованием дополнительных алгоритмов расшифровки скачков фазы света из-за резких разрывов профиля на гранях. Из вышесказанного можно сделать заключение, что цифровая голографическая микроскопия является крайне эффективной технологией контроля поверхности оптических материалов микросистем, реализуемой в режиме реального времени и с высокими измерительными характеристиками.

***Литература***

1. Coquoz et al. 14th Annual International Conference of the IEEE-EMBS, Paris, 1992. P. 338–339.
2. Cuche et al. 1999, Applied Optics 38, 6994–7001.
3. Colomb et al. Journal of the Optical Society of America, 2006, A-Optics Image Science and Vision 23, 3177–3190.

УДК 629.052.7.06
ББК 32.42-01
DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.475.476

# Развитие МЭМС, создание микроакселерометров, микрогироскопов и других изделий микросистемной техники

## Development of MEMS and Production of Micro-accelerometers, Micro-gyroscopes and Other Microsystems Engineering

**Тимошенков С. П., Калугин В. В., Тимошенков А. С.**
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*spt111@mail.ru*

**Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Timoshenkov A. S.**
*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*spt111@mail.ru*

Проанализированы технологические способы создания МЭМС. Рассмотрены преимущества и недостатки использования различных способов выделения полезного сигнала. Приведены параметры микроакселерометров и микрогироскопов. Предложены пути совершенствования технологии изготовления и обозначены перспективы развития МЭМС.

**Ключевые слова:** МЭМС; микроакселерометр; микрогироскоп; инерциальные измерительные системы; элементы фотоники; 3D-микросборки; многослойные структуры; структуры «кремний на изоляторе» — КНИ.

Современные технологии микросистемной техники позволяют создавать сенсорные системы, широко применяемые во всех отраслях науки и техники, специальных и коммерческих устройствах. Следует отметить существенное увеличение интереса к сенсорным и актюаторным микросистемам в связи с расширением производства автономно функционирующих комплексов, робототехнических изделий, беспилотных подвижных объектов и т. д. Наиболее востребованными являются сенсорные системы, позволяющие измерять линейное ускорение, угловую скорость, давление, температуру, удары, вибрацию и т. д., а также определять (вычислять) навигационные параметры, осуществлять стабилизацию, устанавливать ориентацию в пространстве и т. д. Перспективными материалами для изготовления упругих элементов МЭМС являются кремний, кварц, карбид кремния, нитрид алюминия, оксид алюминия, стекло, керамика, некоторые органические материалы и т. д.

Существуют различные методы выделения полезного сигнала — тензометрический, электростатический, магнитоэлектрический, оптический, полевой, пьезоэлектрический, температурный, эмиссионный и многие другие. Реализация этих методов предполагает совмещение разнородных материалов, разработку специализированных конструкций и технологий, а также использование КНИ и сложных многослойных структур. Разнообразие методов преобразования сигналов, технологий и материалов объясняется не только имеющимися и исторически сложившимися в различных центрах базовыми технологиями, но и ожидаемыми

отдельными уникальными перспективами разработанных приборов, сулящими получение некоторого превосходства в достижении уникальных технических параметров или экономических преимуществ при производстве. Действительно, параметры микросистем (в частности инерциальных приборов — микроакселерометров и микрогироскопов) так сильно прогрессируют, что определяют перспективы развития многих производств.

Проведенный анализ, моделирование и экспериментальные исследования показывают перспективность совмещения в изделиях МЭМС различных методов выделения и обработки полезного сигнала для улучшения точностных параметров приборов. Показана необходимость и перспективность использования гетерогенной интеграции и 3D-микросборок для инерциальных микросистем. Разработана и исследована конструкция чувствительного элемента сенсора микроперемещений на основе интерферометра Майкельсона, совмещающего элементы микромеханики и фотоники. Проведены исследования технологических возможностей изготовления кольцевых фотонных резонаторов для создания инерциальных измерительных систем. Исследованы технологии создания перспективных чувствительных элементов микрогироскопов и микроакселерометров, функционирующих на основе электростатического и магнитоэлектрических методов. Показаны основные технологические решения при создании чувствительных элементов МЭМС, изготавливаемых с использованием кремния и многослойных структур. Приведены параметры разработанных и изготовленных инерциальных измерительных систем — микроакселерометров и микрогироскопов. Разработаны технологические процессы создания микромеханических исполнительных элементов — подвижных микрозеркал и вибрирующих подвижных элементов для различных сенсоров.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.477.478

# Опыт разработки и изготовления высокоточного одноосевого МЭМС-гироскопа

## Experience of Developing and Manufacturing a High-precision Single-axis MEMS Gyroscope

**Урманов Д. М., к. т. н., Марков И. В., Марков В. И.**
*ООО «Совтест АТЕ»*
*305000, г. Курск, ул. Володарского, 49а*
*urmanov@sovtest-ate.com*

**Urmanov D. M.[1], Ph.D, Markov I. V.[1], Markov V. I.[1]**
*"Sovtest ATE" LLC*
*49a Volodarskogo St., Kursk, 305000*
*urmanov@sovtest-ate.com*

Современные инерциальные системы ориентации и навигации, применяемые сегодня в промышленности, практически невозможно представить без микромеханических сенсоров линейных и угловых ускорений. В работе представлен опыт разработки, изготовления и испытания высокоточного одноосевого МЭМС-гироскопа (ось *z*).
**Ключевые слова:** МЭМС-гирсокоп; инерциальные системы.

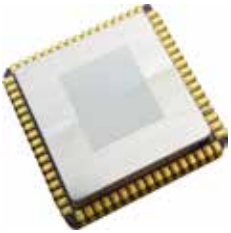
Today it is almost impossible to imagine modern inertial orientation and navigation systems used in industry without micromechanical sensors of linear and angular accelerations. The paper presents the experience of developing, manufacturing and testing a high-precision single-axis MEMS gyroscope (*z*-axis).
**Keywords:** MEMS-gyro; inertial measurement unit (IMU).

В последние годы широкое распространение по всему миру получили датчики, основанные на микроэлектромеханических системах, так называемых МЭМС. Популярность данных устройств обусловлена рядом причин, основными из которых являются простота их использования, относительно невысокая цена и малые габариты. МЭМС-датчики, как правило, оснащаются интегрированной электроникой обработки сигнала, поступающего с кремниевых чувствительных элементов. Этим обуславливаются их высокая надежность и способность обеспечивать стабильные показания в достаточно жестких условиях окружающей среды (перепады температур, удары, влажность, вибрация, электромагнитные и высокочастотные помехи). Совокупность данных преимуществ побуждает производителей систем для различных сфер применения (от авиа- и автомобилестроения до выпуска бытовой техники) использовать в своих разработках те или иные МЭМС-сенсоры [1].

С учетом обозначенных преимуществ МЭМС-датчиков в статье представлен опыт предприятия «Совтест АТЕ» в области разработки, изготовления и испытания одноосевых (*z*) микроэлектромеханических гироскопов с диапазоном ±499 °/с. На рис. 1 показаны внешний вид и основные характеристики МЭМС-гироскопа.

В работе представлены основные этапы дорожной карты по разработке и изготовлению различных МЭМС-изделий в РФ. Рассказывается об опыте взаимодействия с АО «ГОСНИИП» (г. Москва) в области испытаний микроэлектромеханических гироскопов. Рассматриваются зарубежные и российские подходы к испытаниям

МЭМС-гироскопов. Приводятся примеры использования высокоточных микроэлектромеханических систем по различным областям применения.



| Параметр | Значение | Примечание |
|---|---|---|
| Диапазон преобразования | ±499°/с | возможно увеличение диапазона |
| Нелинейность масштабного коэффициента | <500* ppm *без коррекции | |
| Полоса пропускания | 120 Гц | возможно увеличение полосы пропускания |
| Пороговая чувствительность | <50°/ч | |
| Диапазон рабочих температур | –40...+85°С | возможно расширение диапазона температур |
| Ударопрочность | 50 g | возможно повышение ударопрочности |
| Нестабильность нуля | <10°/ч | возможно существенное уменьшение нестабильности нуля до <1°/ч |
| Случайное угловое блуждание | <1°/√ч | |
| Напряжение питания | 5 В | возможна корректировка по ТЗ заказчика |
| Габаритные размеры | см. рис. 1 | возможно уменьшение размеров по ТЗ заказчика |

**Рис. 1.** Внешний вид и основные характеристики МЭМС-гироскопа ±499 °/с

***Литература***

1. Урманов Д. М. Цифровые системы мониторинга для индустриальной, транспортной и других сфер применения // Материалы VIII Международного МЭМС-форума. — Москва, 2019.

Recently, sensors based on microelectromechanical systems, the so-called MEMS, have become widely used around the world. The popularity of these devices is due to a number of reasons, the main of which are their ease of use, relatively low price and small dimensions. MEMS sensors are usually equipped with integrated electronics for processing the signal coming from silicon sensing elements. This is due to their high reliability and ability to provide stable readings in fairly harsh environmental conditions (temperature changes, shocks, humidity, vibration, electromagnetic and high-frequency interference). The combination of these advantages encourages manufacturers of systems for various fields of application (from the aviation and automotive industries to household appliances) to use certain MEMS sensors in their developments [1].

Taking into account the indicated advantages of MEMS sensors, the article presents the experience of the Sovtest ATE enterprise in the field of development, manufacture and testing of single-axis (*z*) microelectromechanical gyroscopes with a range of ±499 °/s. Fig. 1 shows the appearance and main characteristics of the MEMS gyroscope.

The paper presents the main stages of the roadmap for the development and manufacture of various MEMS products in the Russian Federation. The article describes the experience of interaction with GOSNIIP JSC (Moscow) in the field of testing microelectromechanical gyroscopes. Foreign and Russian approaches to testing MEMS gyroscopes have been considered. Examples of the use of high-precision microelectromechanical systems in various fields of application have been given.

***References***

1. Urmanov D. M. Digital monitoring systems for industrial, transport and other applications: papers of the VIII International MEMS Forum, Moscow, 2019.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.479.480

# Запуск МЭМС-элементов в производство: от разработки технологии до серийного выпуска

## Putting into Operation the MEMS-elements: from the Technology Design to the Serial Production

**Шамирян Д. Г., Род И. А.**
*ООО «Маппер»*
*109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5*
*Denis.Shamiryan@mapperllc.ru*

**Shamiryan D. G., Rod I. A.**

В данной работе рассматриваются проблемы перехода от стадии разработки технологии производства чувствительных МЭМС-элементов инерциальных датчиков к серийному производству. Освещены принципы обеспечения качества, воспроизводимости и повышения выхода годных приборов с пластины.
**Ключевые слова:** МЭМС; производство; выход годных.

На сегодняшний день приборы, изготовленные на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), широко используются в различных сенсорах и датчиках, в частности датчиках инерциальной навигации. Залогом технологической независимости Российской Федерации является наличие бесперебойного серийного производства чувствительных МЭМС-элементов, обеспечивающего высокое качество (соответствие характеристик требованиям заказчика и повторяемость результатов) продукции и высокий уровень выхода годных, в целях контроля себестоимости выпускаемой продукции.

Повторяемость результатов производства обеспечивается следующими факторами:

- своевременное техническое обслуживание оборудования;
- статистический контроль процессов, производимых оборудованием;
- регулярный контроль загрязнений, вносимых оборудованием;
- контроль за условиями чистых производственных помещений;
- контроль за изменениями техпроцессов и техмаршрутов;
- регулярный межоперационный и выходной контроль изделий;
- входной контроль сырья и материалов, контроль поставщиков;
- анализ отклонений от техпроцесса, поиск и устранение причин отклонений и ошибок;
- анализ рисков при принятии решений, влияющих на результаты производства.

Вторым аспектом обеспечения качества является постоянная работа над увеличением выхода годных. Сначала необходимо определить теоретический предел плотности дефектов на полупроводниковой пластине, зависящий от класса чистоты помещений и количества дефектов, привносимых оборудованием. Затем провести анализ выхода годных по принципу Парето и приступить к устранению наиболее весомых причин падения выхода годных.

Такой процесс в нашем случае будет проиллюстрирован запуском в серию чувствительных элементов, изготавливаемых по технологии МЭМС. За полтора года с момента перехода продукта из этапа НИОКР в серийное производства выход годных элементов вырос с 17 до 60 % в партии, лучшие пластины обеспечивают до 83 % годных элементов при теоретическом пределе в 85 %. За это время произведено более 2000 чувствительных элементов, возвратов на входном контроле заказчика — около 1 % (только по внешнему виду), отказов приборов из-за брака чувствительных элементов не зафиксировано.

УДК 53.087.92 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.481.483

# Особенности технологии изготовления чувствительных элементов маятникового микроакселерометра для инерциальных модулей перспективных систем технического контроля

## Features of the Sensitive Elements Manufacturing Technology of the Pendulum Micro-accelerometer for Inertial Modules of Promising Technical Control Systems

**Обижаев Д. Ю., Жукова С. А., Суздальцев С. Ю., Сальникова Т. В., Иванов С. Ю.**
*ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»*
*115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а*

**Obizhayev D. Yu., Zhukova S. A., Suzdal'tsev S. Yu., Sal'nikova T. V., Ivanov S. Yu.**
*FSUE "CNIIHM"*
*16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487*

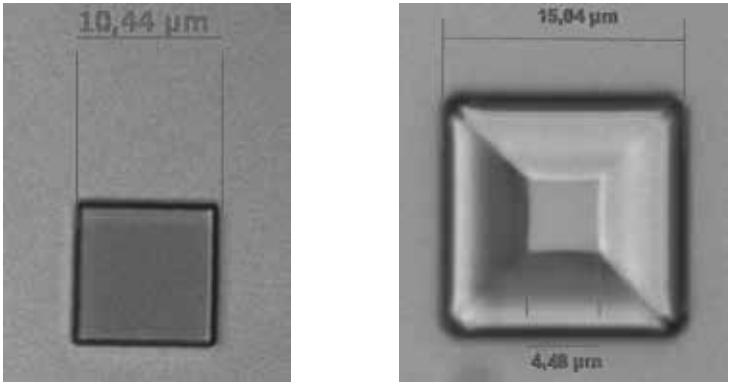
В настоящей работе представлены результаты оптимизации технологии создания чувствительных элементов микроакселерометров в целях устранения нежелательного эффекта «подлипания» маятников в процессе их изготовления и эксплуатации. Проведена оценка максимально допустимой площади диэлектрических упоров.

**Ключевые слова:** МЭМС; микромеханический акселерометр; герметизация на уровне пластины; WLP; маятниковый акселерометр.

В настоящее время активно ведутся работы по созданию и совершенствованию характеристик микромеханических инерциальных датчиков навигационного и тактического классов точности, в том числе датчиков линейного ускорения (микроакселерометров). Они находят широкое применение в составе бесплатформенных навигационных систем (БИНС), обеспечивающих измерение параметров траекторного движения и ориентации объектов в составе навигационных систем. Особое внимание в этой связи уделяют кремниевым микромеханическим акселерометрам маятникового типа. Они обладают высокими техническими характеристиками (высокие чувствительность и разрешающая способность, низкий уровень шума). При этом, благодаря отсутствию в составе чувствительных элементов материалов с различающимися термическими коэффициентами линейного расширения, обеспечивается низкий температурный и временной дрейф. Кроме того, конструкция обладает высокой прочностью к воздействию ударных нагрузок. Конструктивно чувствительные элементы таких акселерометров представляют собой кремниевый маятник, закрепленный между двумя неподвижными кремниевыми электродами, образуя таким образом обкладки дифференциального конденсатора. В объеме, ограниченном электродами, создано пониженное давление, обеспечивающее требуемый частотный диапазон функционирования прибора. Герметизация, как правило, осуществляется на уровне пластины (Wafer Level Packaging — WLP) методом прямого сращивания (без применения дополнительных промежуточных адгезионных слоев).

Во ФГУП «ЦНИИХМ» разработан и изготовлен кремниевый микромеханический акселерометр с характеристиками, соответствующими лучшим зарубежным аналогам: диапазон линейных ускорений ±9,8 м/с$^2$ (±1 g), чувствительность не менее 2000 мВ/g (при напряжении питания 5 В), полоса пропускания не менее 250 Гц, шум не более 20 мкg/Гк$^{0,5}$, смещение нуля не более 25 мкg/°С. Следует отметить, что в процессе изготовления и испытаний часть акселерометров выходили из строя в связи с «подлипанием» маятника к поверхности одного из неподвижных электродов, что в значительной степени снижало процент выхода годных изделий. В настоящей работе представлены результаты по оптимизации технологии изготовления чувствительных элементов микромеханических акселерометров в целях устранения эффекта «подлипания» маятников.

Было установлено, что в процессе вертикального перемещения маятники «подлипают» к поверхности диэлектрических упоров на поверхности кремниевых электродов. Данные упоры представляют собой квадратные элементы на основе диоксида кремния размером 15×15 мкм, препятствующие электрическому контакту неподвижных электродов и маятника при его сильном отклонении. Оценка усилия отрыва инерционной массы от поверхности упоров была выполнена по теории ДМТ [1] с учетом данных о характеристиках контактирующих поверхностей (шероховатость, поверхностная энергия) [2]. Оценочная величина усилия отрыва составляет примерно 123 мН, что на десятичный порядок меньше силы упругости, возникающей в результате деформации подвеса маятника (11 мН). Таким образом, для устранения эффекта «подлипания» маятников необходимо обеспечить снижение площади контакта их поверхности с поверхностью упоров не менее чем в десять раз. Микрофотографии упоров до и после оптимизации технологии их формирования представлены на рис. 1.




*а* *б*

**Рис. 1.** Микрофотографии упоров до (*а*) и после (*б*) оптимизации технологии их формирования

Оптимизированная технология изготовления упоров предполагает травление слоя диоксида кремния, сформированного методом термического окисления,

в буферном травителе через двухслойную металлическую маску на основе титана и ванадия. Сформированные в результате упоры имели форму усеченной пирамиды. Площадь верхнего основания такой пирамиды меньше площади нижнего основания в 10–35 раз (в зависимости от соотношения толщин металлических слоев маски и режимов травления). При этом пирамидальная форма упоров является предпочтительной.

Предложенный подход позволил полностью устранить нежелательный эффект «подлипания» маятников при сохранении всех заявленных технических характеристик микроакселерометров.

***Литература***

1. Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Шаповал С. Ю., Гринькин Е. А. Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных сухих адгезивов. Теоретические аспекты // Нано- и микросистемная техника, 2006. — № 2. — С. 2–8.
2. Gui C., Elwenspoek M., Tas N. and Gardeniers J. G. E. The effect of surface roughness on direct wafer bonding // Journal of Applied Physics, 1999. Vol. 85. № 10. P. 7448–7454.

УДК 621.382-027.31 + 621.382 + 658.512.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.484.486

# Исследование влияния технологических факторов на характеристики МШГ-резонатора, изготовленного из $SiO_2$

## Study of the Influence of Technological Factors on the Characteristics of the WGM Resonator Made of $SiO_2$

**Якухина А. В., Кадочкин А. С., к. ф.-м. н., Григорьев Д. М., Никифоров С. В., Амеличев В. В., к. т. н., Светухин В. В., профессор, д. ф.-м. н.**
*НПК «Технологический центр»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1, стр. 7, комната 7237*
*A.Yakuhina@tcen.ru*

**Yakuhina A. V., Kadochkin A. S., Ph.D, Grigorev D. M., Nikiforov S. V., Amelichev V. V., Ph.D, Svetukhin V. V., professor, Sc.D**
*"Technological Centre" SMC*
*Room 7237, bld. 7, 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*A.Yakuhina@tcen.ru*

Представлены результаты исследования влияния шероховатости на добротность оптических резонаторов из $SiO_2$, работающих в режиме мод шепчущей галереи (МШГ). Количественная оценка величины шероховатости профиля резонатора проведена двумя способами — с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) Bruker и растрового электронного микроскопа (РЭМ) Helios 650. На основании полученных экспериментальных данных о шероховатости проведены численные расчеты добротности.
**Ключевые слова:** моды шепчущей галереи; фотоника; оксид кремния; кремниевая технология; шероховатость; добротность.

The paper presents the results of a study of the effect of roughness on the Q-factor of $SiO_2$ optical resonators operating in the mode of whispering gallery modes (WGM). A quantitative assessment of the roughness of the resonator profile was carried out in two ways using a Bruker atomic force microscope (AFM) and a Helios 650 scanning electron microscope (SEM). Based on the data obtained, numerical calculations of the Q-factor of such resonators have been carried out.
**Keywords:** whispering gallery modes; photonics; silicon oxide; silicon technology; roughness; quality factor.

Оптические МШГ-резонаторы представляют особый интерес для приложений нелинейной оптики, биосенсорики, создания фононных лазеров и т. д. На сегодняшний день существует ряд подходов к их реализации, в том числе с точки зрения выбора материальной базы для их изготовления.

Реализация МШГ-резонаторов на кристалле и их интеграция в фотонные интегральные схемы (ФИС) зачастую связана с использованием кремнийсодержащих материалов. Среди них особое место занимает $SiO_2$, обладающий хорошими оптическими свойствами, близкими к кварцу ($n_{SiO2} = 1{,}46$).

В настоящее время известны резонаторы на основе $SiO_2$, обладающие высокой добротностью ($10^7$–$10^8$) [1]. Авторы [2] считают, что достигнутые показатели

добротности являются переходными. Это обусловлено природой $SiO_2$. При изготовлении резонаторов на основе $SiO_2$ используют $CO_2$-лазер [3], что вызывает ряд ограничений[1].

Коллективом НПК «Технологический центр» разработаны конструктивно-технологические основы по формированию структуры МШГ-резонатора из $SiO_2$ с минимальной величиной шероховатости поверхности (2–3 нм), которой удается достичь без использования $CO_2$-лазера, а также предложен потенциально эффективный способ устранения проблемы деградации добротности во времени. С использованием ранее разработанной методики [4] проведена количественная оценка шероховатости поверхности резонатора, результаты которой легли в основу численных расчетов.

В результате численных расчетов установлено, что снижение шероховатости до 2–3 нм приводит к увеличению его добротности до $10^9$.

Полученные конструктивно-технологические решения позволят перейти к оптимизации технологического процесса изготовления резонаторов МШГ для исследования возможности создания ФИС и дискретных приборов на их основе.

***Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 0Н59-2019-0020).***

***Литература***

1. Li G. et al. High-Q silica microdisk optical resonators with large wedge angles on a silicon chip // Photonics Research, 2015. V. 3. № 5. P. 279–282.
2. Chen D. et al. On-chip ultra-high-Q silicon oxynitride optical resonators // Acs Photonics, 2017. V. 4. № 9. P. 2376–2381.
3. Armani D. K., Kippenberg T. J., Spillane S. M. and Vahala K. J. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip. Nature 421, 925–928 (2003).
4. Yakuhina A. V. et al. Influence of the Surface Roughness of a Silicon Disk Resonator on Its Q-Factor // Photonics. — Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. V. 8. № 6. P. 225.

Optical WGM resonators are of particular interest for applications in nonlinear optics, biosensorics, phonon lasers, etc. Today, there are a number of approaches to their implementation, including from the point of view of choosing the material base for their manufacture. Most of them are mainly applicable for the implementation of stand-alone modular optical devices.

Implementation of WGM resonators on a chip and their integration into photonic integrated circuits (PIC) is often associated with using silicon-containing materials. Among them, a special place is occupied by $SiO_2$, which has good optical properties close to quartz ($n_{SiO2} = 1.46$).

Currently known resonators based on $SiO_2$ have a high Q factor ($10^7$–$10^8$) [1].

The authors of [2] believe that the achieved figures of merit are transient. In the manufacture of resonators based on $SiO_2$, a $CO_2$-laser is used [3], which causes a number of limitations [1].

The scientific group of the SMC Technological Centre has developed constructive and technological foundations for the formation of a WGM resonator structure from $SiO_2$ with a minimum surface roughness (2–3 nm), which can be achieved without using a $CO_2$

laser, and also proposed a potentially effective way to eliminate the problem of Q-factor degradation over time. Using the previously developed technique [4], a quantitative assessment of the resonator surface roughness was carried out, whose results formed the basis of numerical calculations.

As a result of numerical calculations, it has been found that a decrease in the roughness to 2–3 nm leads to an increase in its figure of merit to $10^{10}$.

The obtained constructive and technological solutions will make it possible to move on to optimizing the technological process of manufacturing WGM resonators in order to study the possibility of creating PICs and discrete devices based on them.

***The work was carried out within the framework of the state assignment (project № 0N59-2019-0020).***

***References***

1. Li G. et al. High-Q silica microdisk optical resonators with large wedge angles on a silicon chip // Photonics Research, 2015. V. 3. № 5. P. 279–282.
2. Chen D. et al. On-chip ultra-high-Q silicon oxynitride optical resonators // Acs Photonics, 2017. V. 4. № 9. P. 2376–2381.
3. Armani D. K., Kippenberg T. J., Spillane S. M. and Vahala K. J. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip. Nature 421, 925–928 (2003).
4. Yakuhina A. V. et al. Influence of the Surface Roughness of a Silicon Disk Resonator on Its Q-Factor // Photonics. — Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. V. 8. № 6. P. 225.

УДК 681.586.78 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.487.488

# Туннельные магнитные контакты для систем памяти и чувствительных датчиков магнитного поля

## Tunnel Magnetic Junction for Memory Systems and Magnetic Field Sensors

**Пашенькин И. Ю., Сапожников М. В., Гусев Н. С., Гусев С. А., Татарский Д. А., Фраерман А. А.**
*Институт физики микроструктур РАН*
*603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105*
*andr@ipmras.ru*

**Pashenkin I. Yu., Sapozhnikov M. V., Gusev N. S., Gusev S. A., Tatarsky D. A., Frayerman A. A.**
*Institute for Physics of Microstructures RAS*
*Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

Разработана технология получения туннельных магнитных контактов на основе многослойных структур CoFeB/MgO/CoFeB, демонстрирующих магнетосопротивление величиной ~200% и пригодных для использования при построении систем энергонезависимой памяти и датчиков магнитного поля. Показано, что магнитное состояние этих туннельных контактов может изменяться под действием электрического поля.
**Ключевые слова:** туннельное магнитосопротивление; магнитная память; сверхчувствительные датчики магнитного поля; магнитоэлектрический эффект.

A technology has been developed for producing tunnel magnetic junctions based on multilayer CoFeB/MgO/CoFeB structures, demonstrating magnetoresistance of ~200% and suitable for use in the construction of non-volatile memory systems and magnetic field sensors. It has been shown that the magnetic state of these tunnel contacts can change under the action of an electric field.
**Keywords:** tunnel magnetoresistance; magnetic memory; magnetic field sensors; magnetoelectric effect.

Туннельные магнитные контакты являются основой для создания новых систем магнитной памяти, чувствительных датчиков магнитного и генераторов СВЧ-излучения (наноосцилляторов). Эти применения основаны на гигантской величине туннельного магнитосопротивления, т.е. зависимости электросопротивления туннельного контакта от приложенного внешнего магнитного поля. Относительное изменение сопротивления может достигать сотен процентов при сравнительно небольшом внешнем поле менее 100 Э. Нами разработана технология получения туннельных магнитных контактов, основанная на магнетронном напылении и фотолитографии. Завершающим этапом изготовления был термический отжиг готовых чипов в вакууме при температуре 330°C в течение 2 часов, в результате которого наблюдалось существенное увеличение TMR-эффекта с 10–20% до 100–200% для разных образцов. Нами показано также, что контакты обладают высокой

стойкостью к электрическому пробою, что позволяет прикладывать напряжения до 1,25 В на один элемент. При этом обнаруживается сдвиг кривой намагничивания свободного слоя на величину до 10 Э при плотности тока, протекающего через систему, ~$10^3$ А/см$^2$ [1]. Данный эффект может быть использован при разработке энергоэффективной MRAM.

***Литература***

1. Пашенькин И. Ю., Сапожников М. В., Гусев Н. С. и др. Магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактах CoFeB/MgO/CoFeB. Письма в ЖЭТФ, **111,** 12 (2020), 815–818.

УДК 621.3.049.774 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.489.491

# Микроэлектромеханический переключатель для СВЧ-ограничителя мощности

## MEMS Switch for Microwave Power Limiter

**Кулинич И. В.[1,2,3], Хохол Д. С.[2], Бабошко Д. В.[1], Шестериков Е. В.[1]**
*[1] ИОА СО РАН им. Зуева*
*634055, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1*
*kulinich@tusur.ru*
*[2] АО «НПФ «Микран»*
*634041, г. Томск, ул. Кирова, 51д*
*[3] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

**Kulinich I. V.[1,2,3], Khokhol D. S.[2], Baboshko D. V.[1], Shesterikov Ye. V.[1]**
*[1] IOA SB RAS*
*1 Academician Zuev Square, Tomsk, 634055, Russia*
*kulinich@tusur.ru*
*[2] Research and Production Company Micran*
*51d Kirova Ave., Tomsk, 634043, Russia*
*[3] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR University)*
*40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia*

Исследована композитная конструкция балки МЭМС-ключа, на основе которой был спроектирован и разработан частотно-зависимый СВЧ-ограничитель мощности. Проведены исследования электрических характеристик СВЧ-ограничителя мощности на основе МЭМС-ключа.
**Ключевые слова:** МЭМС-ключ; СВЧ-ограничитель мощности.

The paper presents the composite structure of the MEMS switch beam that is used as a base for a frequency-dependent microwave power limiter. Studies of the electrical characteristics of a microwave power limiter based on a MEMS switch have been carried out.
**Keywords:** MEMS switch; microwave power limiter.

В современных радиолокационных станциях (РЛС) и приемной аппаратуре СВЧ-диапазона ограничители мощности (ОМ) являются одним из важнейших электронных элементов СВЧ-тракта, обеспечивающих защиту входных цепей приемника от соседних и внешних СВЧ-сигналов[1].

Частотно-зависимые ограничители мощности на основе пленок железоиттриевого граната [2] и твердотельных ключей [3] при высоких уровнях СВЧ магнитного поля имеют нелинейность характеристики. В свою очередь, ограничители мощности на основе МЭМС-ключей имеют высокую линейностью и низкие вносимые потери, но применение в ОМ ограничивается большим временем переключения. Цель работы — исследовать влияние композиционной структуры балки на параметры МЭМС-ключа и разработать СВЧ ОМ на основе МЭМС-ключа.

При проектировании переключателя за основу была взята конструкция нормально открытого переключателя электростатического типа [4], который выполнен в виде

медной проводящей балки, закрепленной на двух опорах. Основные геометрические параметры переключателя были выбраны исходя из минимальных механических напряжений, возникающих в свободно подвешенной балке: длина балки 450 мкм, ширина — 60 мкм. Минимальная величина зазора между балкой — и шунтирующим электродом обусловлена результатами СВЧ-моделирования и составила 1 мкм.

Наиболее сильный изгиб наблюдается при толщине балки около 400 нм, однако при такой толщине значительно ухудшается жесткость конструкции, что повышает вероятность залипания контакта. Для изменения жесткости исследовалась композиционная структура балки.

Согласно данных из работы [5], наиболее подходящим материалом является алюминий: малый модуль упругости, близкий к меди ТКР, а также малая плотность и, соответственно, повышенная резонансная частота. На рис. 2 представлены результаты моделирования механических напряжений в композиционной (Al-Cu) балке переключателя вдоль оси анкерного крепления.

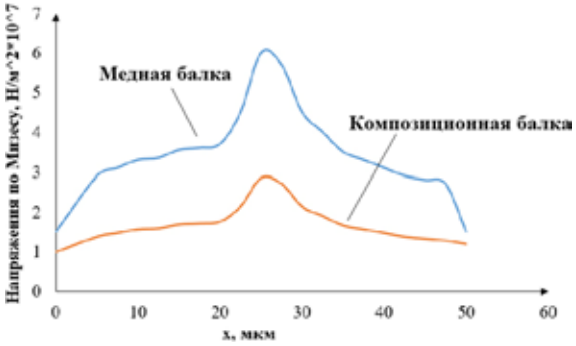



**Рис. 2.** Результат моделирования: механические напряжения в балке переключателя вдоль оси анкерного крепления

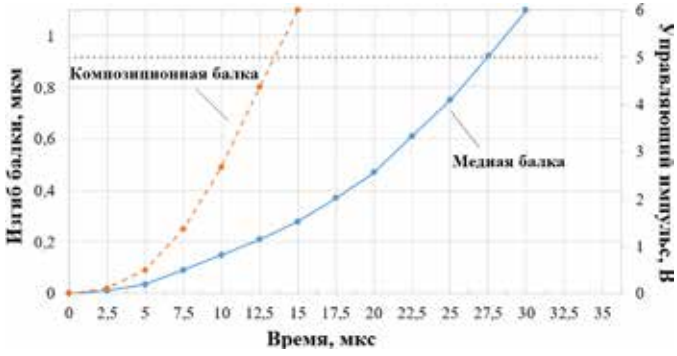



**Рис. 3.** Результат моделирования: влияние структуры балки на время включения переключателя

Для выбранных материалов был произведен расчет времени включения переключателя с композиционной и медной балкой (рис. 3).

На основании полученного ключа был спроектирован и изготовлен СВЧ-ограничитель мощности. На рис. 4 представлена характеристика полученного СВЧ-ограничителя мощности.

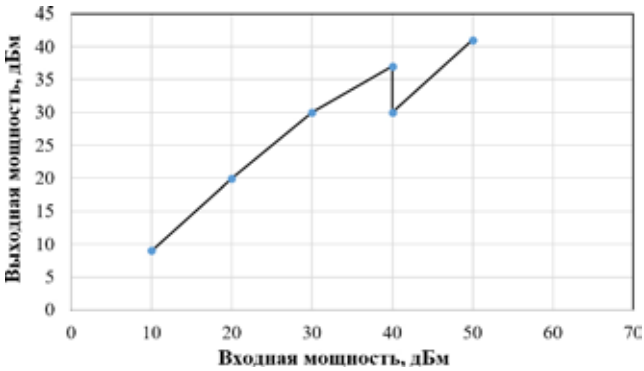



**Рис. 4.** Результаты измерения мощности, проходящей через СВЧ-ограничитель мощности

Величина ослабления сигнала определяется обратными потерями полосно-пропускного фильтра и равняется 15 дБ.

***Измерения выполнены на оборудовании ЦКП «Импульс» ТУСУР.***
***Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.***

***Литература***

1. Усов А. А. Исследование и разработка твердотельного приемно-усилительного модуля 8-миллиметрового диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов мощностью до 1 кВт в импульсе: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, Санкт-Петербург, 2012. — 18 с.
2. Patel S. D., Dubrowsky L., Saddow S. E., Kaul R. and Garver R. V. Microstrip plasma limiter // Microwave Symposium Digest, 1989. IEEE MTT-S International, 1989. Vol. 3. P. 879–882.
3. Smith D. G., Heston D. D. and Allen D. L. Designing high-power limiter circuits with GaAs PIN diodes // Microwave Symposium Digest, 1999 IEEE MTT-S International, 1999. Vol. 1. P. 329–332.
4. Кулинич И. В., Добуш И. М., Бобошко Д. В. Секция СВЧ-аттенюатора на основе СВЧ МЭМ-ключа с медной металлизацией // Наноиндустрия, 2020. — С. 441–443.
5. Кулинич И. В. Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интеральных микросхем: диссертация канд. техн. наук. Томский гос. университет систем управления и радиоэлектроники. — Томск, 2019.

УДК 53.087.92 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.492.494

# Особенности технологии формирования чувствительных элементов инерциальных датчиков на основе структур «кремний над полостью», герметизируемых на уровне пластин

## Features of the Technology of Forming Sensitive Elements of Inertial Sensors Based on the Structures of "Silicon over the Cavity", Sealing at the Level of Plates

**Жукова С. А., Новичков Е. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю., Турков В. Е., Ромахин П. А., Ульянов С. А., Иванов С. Ю.**
*ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»*
*115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а*

**Zhukova S. A., Novichkov Ye. A., Obizhayev D. Yu., Suzdal'tsev S. Yu., Turkov V. Ye., Romakhin P. A., Ul'yanov S. A., Ivanov S. Yu.**
*FSUE "CNIIHM"*
*16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487*

Рассмотрены особенности микроабразивной обработки глухих отверстий глубиной до 700 мкм в пластинах из стекла и кремния через медную маску при формировании электрических вакуумплотных контактов к чувствительным элементам МЭМС на основе структуры «кремний над полостью», герметизированных на уровне пластины.

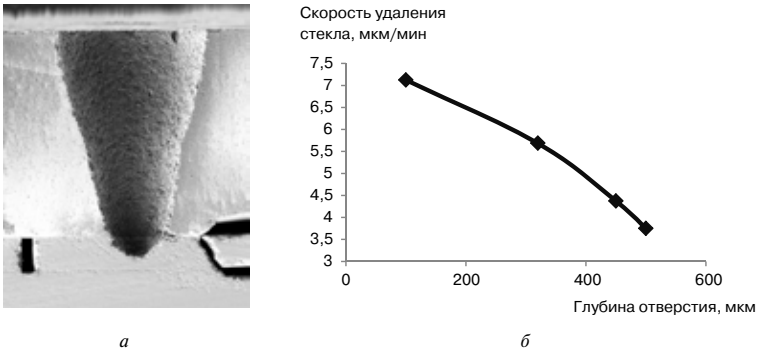
**Ключевые слова:** МЭМС; микроабразивная обработка; фотолитографическая маска; прямое сращивание; анодное сращивание.

Абразивно-струйная обработка (Abrasive jet machining — AJM) или микроабразивная обработка — набирающая популярность технология обработки стеклянных и кремниевых подложек для изготовления чувствительных элементов МЭМС. При такой обработке на подложку воздействует поток абразивных частиц, причем поверхность подложки экранирована износостойкой маской со сформированным на ней рисунком. Маска определяет точность передачи рисунка на подложку [1]. В представленной работе обрабатываемая подложка представляет собой трехслойную конструкцию, состоящую из нижней пластины кремния или стекла толщиной 380–1000 мкм, центральной пластины кремния толщиной 60–100 мкм, «крышки» — верхней пластины из стекла 250–700 мкм. Пластины прочно соединены между собой методами анодного и прямого сращивания так, чтобы сформировать систему вакуумплотных полостей. В центральной пластине кремния с помощью системы канавок предварительно сформирована структура чувствительного элемента. Цель изготовления глухих отверстий через стеклянную крышку состоит в создании электрических вакуумплотных контактов к центральной пластине кремния, т. е. к чувствительному элементу.

**Абразивно-устойчивая медная маска**. Для получения глухих отверстий глубиной до 700 мкм при микроабразивной обработке стекла и кремния были изготовлены медные маски толщиной 50 мкм. Для этого на поверхность стеклянной крышки наносился металлический электропроводный слой Ti/Cu 50/1000 нм, затем с помощью фотолитографии формировалась маска из фоторезиста SU-8 в виде столбиков высотой 60–80 мкм и диаметром 250 мкм. После этого проводилось гальваническое

наращивание слоя из меди до толщиной 50–60 мкм, слой меди покрывал всю поверхность стеклянной крышки кроме участков со столбиками. Столбики из SU-8 не удалялись.

**Микроабразивная обработка.** Порошок $Al_2O_3$ (электрокорунда) со средним размером частиц 27 мкм подавался на пластину в струе сжатого воздуха 100 Psi через сопло 0,75 мм. Расстояние между соплом и обрабатываемой пластиной составляло 45 мм. Обнаружено, что при этих режимах микроабразивной обработки скорость удаления меди в 38 раз ниже скорости удаления фоторезиста SU-8. Поэтому фоторезистивные столбики способствовали формированию резких границ на отверстиях диаметром 250 мкм в медной маске. Для получения отверстий с диаметром, сопоставимым с размером абразивных частиц, по мере возрастания глубины отверстий скорость обработки падала [2]. В работе экспериментально определены скорости удаления стекла и кремния в отверстиях различной глубины (рис. 1) и диаметра при фиксированных режимах микроабразивной обработки. Определено, что при микроабразивной обработке толщина медной маски должна составлять не менее 20 мкм для надежной защиты поверхности стеклянной крышки, устранения дефектообразования и сохранения четких границ отверстия.




*а* *б*

**Рис. 1.** Изменение скорости удаления стекла и кремния в отверстиях в зависимости от глубины проделанного отверстия (рис. 1) при микроабразивной обработке частицами $Al_2O_3$ диаметром 27 мкм в струе сжатого воздуха 100 Psi через сопло 0,75 мм с расстояния между соплом и обрабатываемой пластиной 45 мм (*а*), СЭМ-изображение профиля отверстия диаметром 250 мкм через стекло толщиной 380 мкм до середины центральной пластины кремния толщиной 60 мкм (*б*)

На основании полученных результатов разработан процесс формирования глухих отверстий диаметрами 250 и 500 мкм с глубиной до 700 мкм через стеклянную крышку для создания электрических вакуумплотных контактов к чувствительным элементам МЭМС, выполненных на основе структуры «кремний над полстью», герметизированных на уровне пластины.

***Литература***

1. Achtsnick M., Drabbe J., Hoogstrate A. M., Karpuschewski B. Erosion behavior and pattern transfer accuracy of protecting masks for micro-abrasive blasting // J. Mater. Proc. Tech. 2004. 149 (1–3).

2. Wensink H., Berenschot J. W., Jansen H. V., Elwenspoek M. C. Mask Materials in Powderblasting // 10th Workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems (MME 99), September 27–28, 1999, Gif-sur-Yvette, France. P. 199–202.

УДК 535.93 SPIN-код: 4203-9955 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.495.496

# Исследование диодной накачки для генератора несущей в фотонных схемах

## Diode Pump Study for the Carrier Generator in Photonic Circuits

**Якушенков П. О., Чешев Е. А., Горбунков М. В., Тупицын И. М.**
*Физический институт академии наук им. П. Н. Лебедева*
*119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 53*
*loss24680@yandex.ru*

**Yakushenkov P. O., Cheshev E. A., Gorbunkov M. V., Tupitsin I. M.**
*Lebedev Physical Institute of the RAS*
*53 Leninskiy Ave., Moscow, 119991, Russia*

В настоящее время радиофотоника является приоритетным направлением исследования. Для генерации несущей в фотонных схемах используются лазеры с синхронизацией мод. Доклад посвящен исследованию диодной накачки для лазера с синхронизацией мод и сравнению ее с волоконной накачкой.
**Ключевые слова:** диодная накачка; лазер с синхронизацией мод; высокочастотная последовательность импульсов; керровская линза; насыщающийся поглотитель.

At present, radio photonics is a priority area of research. Mode-locked lasers are used to generate a carrier train in photonic circuits. The report is devoted to the study of the diode pumping for the mode-locked laser and its comparison with the fiber pumping.
**Keywords:** diode pumping; mode-locked laser; high frequency pulse train; Kerr lens; saturable absorber.

Радиофотоника является приоритетным направлением исследований. Для генератора несущей в фотонных схемах используют лазеры с синхронизацией мод. Целью данной работы было исследование генерации высокочастотной (ГГц) последовательности импульсов на нелинейном кристалле Nd:$YVO_4$ с диодной накачкой и сравнение ее с волоконной.

Частота, соответствующая времени обхода резонатора длинной 15 см, была 1 ГГц. Далее мы меняли длину резонатора в области устойчивости от 15 до 30 см. На длине резонатора 22 см ближе к границе области устойчивости наблюдалась частичная синхронизация мод. Частота следования импульсов соответствовала времени обхода резонатора — около 800 МГц. При такой длине резонатора полной синхронизации мод достигнуть не удалось при разных уровнях мощности накачки, потому что нестабильные моды синхронизовать не получилось, как и в случае резонатора 15 см. На длине резонатора около 17 см наблюдалась почти полная синхронизация мод при мощности накачки 2,7 А, а при мощности накачки 3 А была полная синхронизация, при накачке 3,5 А опять наблюдалась частичная синхронизация связи с появлением новых мод, которые не синхронизировались. Мы решили поставить дизайнерское стекло «Конашима» для лучшей самофокусировки, тогда мы стали наблюдать стабильные, полностью синхронизованные моды.

Авторы статьи [1] получали синхронизацию мод с волоконной накачкой. Волоконная накачка может сформировать более хорошую керровскую линзу благодаря

более оптимальному распределению интенсивности по радиусу пятна. Однако при волоконной накачке синхронизация мод и генерация стабильных высокочастотных импульсов были гораздо хуже, чем с диодной накачкой и насыщающимся поглотителем. Мы делаем вывод, что основную роль для синхронизации мод и генерации стабильных высокочастотных импульсов играет насыщающийся поглотитель, так что на фоне нее разница в керровской линзе при диодной и волоконной накачке не видна.

***Литература***

1. Liang H. C., Chen Ross C. C., Huang Y. J., Su K. W., and Chen Y. F. Compact efficient multi-GHz Kerr-lens modelocked diode-pumped Nd:YVO4 laser // OPTICS EXPRESS, Dec. 2008. Vol. 16. № 25. P. 21149–21154.

Radio photonics is a priority area of research. Mode-locked lasers are used to generate a carrier train in photonic circuits. In this work we study the diode pumping for the mode-locked laser and its comparison with the fiber pumping.

The frequency corresponding to the round trip time of 15 cm cavity length was 1 GHz. Then we changed the length in the stability region from 15 to 30 cm. At 22 cm cavity length, closer to the boundary of the stability region, partial mode locking was observed. The pulse repetition rate corresponded to the cavity round-trip time was about 800 MHz. With such length, full mode locking was not achieved at different pump power, because unstable modes cannot be synchronized, as in the case of 15 cm. At 17 cm cavity length, almost complete mode locking was observed at a pump power of 2.7 A, and at a pumping of 3 A, there was complete synchronization; at a pumping of 3.5 A, a partial synchronization was again observed with the appearance of new modes that were not synchronized. We decided to put Konashima glass for better self-focusing, then we began to observe stable fully synchronized modes.

The authors of the article [1] obtained fiber-pumped mode locking. Fiber pumping can form a better Kerr lens due to better intensity distribution over the spot radius. However, with fiber pumping, mode locking and generation of stable high-frequency pulses were much worse than with diode pumping and a saturable absorber. We conclude that the main for mode locking and generation of stable high-frequency pulses is a saturable absorber, so that the difference in the Kerr lens under diode and fiber pumping is not visible.

***References***

1. Liang H. C., Chen Ross C. C., Huang Y. J., Su K. W., and Chen Y. F. Compact efficient multi-GHz Kerr-lens modelocked diode-pumped Nd:YVO4 laser // OPTICS EXPRESS, Dec. 2008. Vol. 16. № 25. P. 21149–21154.

УДК 681.586.773 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.497.498

# Инвазивные пассивные беспроводные датчики температуры

## Invasive Passive Wireless Temperature Sensors

**Анцев И. Г., Богословский С. В., Сапожников Г. А.**
*АО «НПП «Радар ммс»*
*197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37, лит. А*
*bogoslovsky_sv@radar-mms.com*

**Antsev I. G., Bogoslovskiy S. V., Sapozhnikov G. A.**
*Research-and-production enterprise "Radar mms" JSC*
*37A Novoselkovskaya St., St. Petersburg, 197375, Russia*
*bogoslovsky_sv@radar-mms.com*

Одним из перспективных направлений исследований является использование устройств в чувствительными элементами на основе ОАВ (объемные акустические волны) резонатора [1, 2]. В качестве чувствительного элемента резонаторного датчика на объемных акустических волнах (ОАВ) использовались кварцевые одновходовые резонаторы.

Датчик на ОАВ состоит из чувствительного элемента (одновходового резонатора), антенны и корпуса. Чувствительный элемент представляет собой тщательно отполированную кварцевую пластину с нанесенной тонкой пленкой серебра.

В инвазивных ОАВ-датчиках температуры используется резонатор с опорной частотой 5,28 МГц и чувствительностью 470 Гц/°С. Антенна выполнена в виде кольца и имеет 12 витков. Диаметр медного провода МГТП — 0,1 мм. Корпус датчика выполнен из пластмассы горячего отверждения на основе фторосодержащих акриловых сополимеров типа порошок-жидкость.

Добротность ОАВ-датчика температуры с антенной составила около 10000.

Алгоритмы работы системы измерения параметров ОАВ-датчиков содержат следующие процедуры:

- формирование совокупности запросных сигналов;
- последовательное излучение запросных сигналов и прием переотраженных датчиком сигналов;
- когерентное накопление;
- принятие решения об измеряемой величине.

Запросные сигналы для ОАВ-резонатора представляли собой последовательность радиоимпульсов с различными частотами. Количество частот для одного резонатора было принято 150.

Длительность запросных сигналов составила 10 мс.

Длительность отклика — 10 мс.

Период повторения — 20 мс.

Алгоритм с использованием градуировочной характеристики показал высокое быстродействие при значительно меньших вычислительных ресурсах. Однако большую стабильность результатов показал алгоритм классификации дискретных сигналов, для которого погрешность в диапазоне температур не превысила 0,1 °С.

Для датчика определялась максимальная глубина погружения (имплантации).

В качестве ограничений использовались допустимая погрешность измерения (0,1 °C) и максимальная импульсная подведенная к антенне мощность (2 Вт). Средняя мощность излучения ERPI составляла менее 10 мВт.

Поскольку все характеристики являются нелинейными, для обеспечения требуемой точности используется полином 2-го порядка для OAB-датчика.

Наилучшие результаты показали датчики на OAB (срез yxl/+β 0° ± 1′) на частоте 5,28 МГц. Для трех датчиков, разнесенных по частоте, была продемонстрирована возможность одновременной работы.

Эксперименты, проведенные в лаборатории и при реальной имплантации в овцу, показали возможность измерения температуры на глубине до 20 см. Погрешность измерения температуры не превысила 0,1 °C. Максимальная импульсная мощность на входе антенны считывателя не превысила 2 Вт.

***Литература***

1. Ivan Antsev, Sergei Bogoslovsky, Alexander Shvetsov, Sergei Zhgoon, Gennadiy Sapozhnikov, Konstantin Trokhimets, Mikhail Derkach. SAW Temperature Sensor on Quartz // Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. Vol. 62. № 6, June 2015. P. 1066–1075.
2. Ivan Antsev, Sergei Bogoslovsky, Alexander Shvetsov, Sergei Zhgoon, Gennadiy Sapozhnikov. Comparative Analysis of the Experience Obtained from the Use of SAW and BAW Wireless Resonator Temperature Sensors for Surgery // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.499.500

# Фотонные интегральные схемы: перспективы разработки и производства в России (развитие технологических платформ интегральной фотоники)

## Photon Integrated Circuits: Development Prospects and Production in Russia (Development of Technological Platforms of Integral Photonics)

**Певчих К. Э., Светиков В. В.**
*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

**Pevchikh K. E., Svetikov V. V.**
*"Zelenograd nanotechnology center" JSC*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527*

Аналогично микроэлектронике в 60-е концепция фотонной передачи информации в наши дни прочно вошла во все сферы обработки и передачи данных.

Фотонные интегральные схемы реализуют обмен данными всех масштабов локализации — от ближнего (внутричипового) до телекома, в том числе в системах квантовой передачи данных. Оптическая передача данных интенсивно осуществляется в системах управления и телеметрии, в частности в бортовых системах летательных аппаратов воздушного и космического базирования, лидарах в беспилотной технике.

Во всех перечисленных областях используется спектральный диапазон от видимого до 4 мкм, но преимущественно используется диапазон 1265–1565 нм. За 30 лет было проведено большое количество исследовательских работ (за рубежом) для поиска оптимальной технологической платформы изготовления приборов интегральной фотоники. В настоящее время определились два лидера — это кремниевая платформа [1–5] и платформа на основе соединений $A^3B^5$ (элементы III-V групп (InP)) [6, 7]. Кремниевая платформа занимает нишу пассивных приборов: это сплиттеры, мультиплексоры, переключатели, аттенюаторы, спектральные фильтры, детекторы и модуляторы. Платформа $A^3B^5$ также позволяет изготавливать эти элементы для телекоммуникационного диапазона длин волн и кроме них может производить активные элементы — лазеры и усилители. Но каждая из этих двух платформ имеет ряд серьезных недостатков и, к сожалению, ни одна из них не может полностью перекрыть достоинства друг друга.

С одной стороны хорошо отработанные в микроэлектронике технологии Si позволят использовать для оптики широкий спектр соединений на основе Si: SiO2, SiON, SiOxGey, Si3N4, Si, Ge-на-Si, а также создавать волноводы с низкими оптическими потерями и резонаторы с высокой добротностью. С другой стороны, платформа $A^3B^5$ позволяет, в отличие от Si-технологий, создавать усиливающие элементы и высокоскоростные модуляторы, но обладает более скромными характеристиками по потерям и характеризуется более сложным многошаговым процессом изготовления.

Перспективный спрос концентрируется на приборах высокой интеграции с функциями модулирования, задержки сигналов и перестройки фильтров, где оптимальным решением двоевластия представляется решение в области объединения этих двух платформ [8, 9]. Ведутся активные исследования в области гибридизации усиливающих элементов $A^3B^5$ (лазеров) с волноводной структурой на основе Si, и уже есть первые результаты компании Intel, Juniper Networks (Aurrion) и AIM, IMEC и NTT ищут альтернативное решение.

На повестке дня расширение спектрального диапазона в область 2–20 мкм, которая чрезвычайно актуальна для задач сенсорики. Например, лазеры 2–3 мкм на основе GaSb показали большую эффективность, чем InP. Потребуется гибридизация соединений GaSb на Si.

***Литература***


1. Jian W., Yun L. On-chip silicon photonic signaling and processing: a review // Science Bulletin, 2018. V. 63. 10.1016/j.scib.2018.05.038.
2. Reza M., Kaushal S., Azaña J. and Chen L. R. Recent Trends and Advances of Silicon-Based Integrated Microwave Photonics // Photonics, 2019. V. 6. № 1: 13. URL: https://doi.org/10.3390/photonics6010013.
3. Zhiping Zhou, Ruixuan Chen, Xinbai Li, Tiantian Li. Development trends in silicon photonics for data centers // Optical Fiber Technology, 2018. V. 44. P. 13–23. URL: https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.03.009.
4. Fang Z., Zhao C. Z. Recent Progress in Silicon Photonics: A Review // International Scholarly Research Notices. Vol. 2012. Article ID 428690, 27 pages, 2012. URL: https://doi.org/10.5402/2012/428690.
5. Tu X., Song C., Huang T., Chen Z., Fu H. State of the Art and Perspectives on Silicon // Micromachines 2019, 10, 51. DOI: 10.3390/mi10010051.
6. Arafin S. and Coldren L. A. Advanced InP Photonic Integrated Circuits for Communication and Sensing // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. Vol. 24. № 1. P. 1–12. Jan.-Feb. 2018. Art № 6100612. DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2754583.
7. Smit M., Williams K. and J. van der Tol. Past, present, and future of InP-based photonic integration // APL Photonics. V. 4. 050901 (2019). URL: https://doi.org/10.1063/1.5087862.
8. Ramirez J. M. et al. III-V-on-Silicon Integration: From Hybrid Devices to Heterogeneous Photonic Integrated Circuits // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. Vol. 26. № 2. P. 1–13. March-April 2020, Art № 6100213. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2939503.
9. Kaur P., Boes A., Ren G., Nguyen T. G., Roelkens G., Mitchell A. Hybrid and heterogeneous photonic integration // APL Photonics 6, 061102 (2021). URL: https://doi.org/10.1063/5.0052700.

УДК 662.989 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.501.503

# Разработка технологии получения дисперсии на основе нанопорошков $Al/Ni/Fe_3O_4$ для нанесения на подложку методом аддитивной печати

## Developing a Technology for Obtaining a Dispersion Based on $Al/Ni/Fe_3O_4$ Nanopowders for Application to a Substrate by Additive Printing

**Переверзева С. Ю.[1,2], Шаман Ю. П.[2], Сыса А. В.[2], Лебедев Е. А.[1], Громов Д. Г.[1]**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт перспективных материалов и технологий 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*[2] НПК «Технологический центр» 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1, стр. 7*
*Svetlo.sci@gmail.com*

**Pereverzeva S. Yu.[1,2], Shaman Yu. P.[2], Sysa A. V.[2], Lebedev E. A.[1], Gromov D. G.[1]**
*[1] National Research University of Electronic Technology, Institute of Advanced Materials and Technologies 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*[2] "Technological Centre" SMC bld. 7, 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*Svetlo.sci@gmail.com*

Технология получения дисперсии энергонасыщенных материалов на основе нанопорошков $Al/Ni/Fe_3O_4$ применима для аддитивной печати путем экструзии дисперсии через формующее отверстие. В данной работе исследованы особенности технологии и тепловыделяющие свойства полученного композита для использования в качестве нагревательного элемента термоэлектрического устройства.
**Ключевые слова:** $Al/Ni/Fe_3O_4$; энергетическая дисперсия; термитные материалы; аддитивная печать; термоэлектричество.

The technology for obtaining a dispersion of energy materials based on $Al/Ni/Fe_3O_4$ nanopowders is applicable for additive printing by extrusion of the dispersion through a forming hole. In this work, the features of the technology and the heat-generating properties of the obtained composite are investigated for use as a heating element of a thermoelectric device.
**Keywords:** $Al/Ni/Fe_3O_4$; energy dispersion; thermite materials; additive printing; thermoelectricity.

Создание автономных источников энергообеспечения, способных работать в экстремальных погодных условиях, — одно из перспективных направлений в микроэлектронике. Большой интерес представляют термоэлектрические генераторы (ТЭГ), в основе работы которых лежит эффект Зеебека. В настоящее время источники тепла на основе нанопорошков энергетических составов, спрессованные в пеллеты, которые используются для «горячей» стороны термоэлектрических генераторов [1], обладают рядом недостатков. Такие пеллеты в форме диска [2] после

прессования обладают повышенной хрупкостью, так как не имеют связующего материала в составе смеси, а при размещении на поверхности ТЭГ эффективность теплопередачи снижается из-за точечного контакта. Ключевым решением данной проблемы является разработка технологии получения стабильной дисперсии энергонасыщенных материалов требуемой вязкости и нанесение материала непосредственно на поверхность теплопроводной подложки или поверхность ТЭГ с помощью аддитивной печати. За счет плотного и прочного контакта энергонасыщенного материала на поверхности ТЭГ возрастут энергоэффективность и надежность системы.

За основу дисперсии были взяты нанопорошок $Al/Ni/Fe_3O_4$ и изопропиловый спирт. Однако для достижения ключевых механохимических свойств дисперсии необходимо решить ряд технологических проблем, связанных с получением равномерного покрытия и исключением растрескивания материала после сушки, а также необходимо добиться надежной адгезии между слоями полученного материала и поверхности ТЭГ.

Для создания равномерного покрытия использовали многостенные углеродные нанотрубки, которые, распределяясь по объему дисперсии, создают удерживающий каркас для наночастиц. Для улучшения адгезии слоя к поверхности использовали клей Pattex Classic, который после высыхания обеспечивает надежное сцепление с поверхностью, а также дополнительную защиту от влаги. Нанесение дисперсий осуществлялось с помощью робота-дозатора Nordson, который позволяет контролировать количество наносимого материала на единицу поверхности. Сформированные слои энергетического материала после сушки содержат не более 5 мас.% функциональных добавок, которые связывают 95 мас.% нанопорошков.

Технология нанесения равномерного тепловыделяющего слоя с надежной адгезией к подложке позволяет получить энергоэффективные источники тепла, а за счет аддитивной печати добиться масштабирования и автоматизации технологического процесса формирования элементов выделения тепла для ряда термоэлектрических устройств.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90219.***

***Литература***

1. Nemtseva S., Lebedev E., Lazarenko P., Gavrilov S., Gromov D., Shaman Yu., Ryazanov R. Nano-sized Al-Ni energetic powder material for heat release element of thermoelectric device // Journal of Physics: Conference Series, 2018. V. 1124. P. 081027.
2. Переверзева С. Ю., Лебедев Е. А. и др. Применение термитных смесей состава Al-Ni-$Fe_3O_4$ в термоэлектрических преобразователях энергии // Сборник научных материалов XVII Всероссийской международной школы — семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А. Г. Мержанова, 2019. — С. 52–53.

The creation of autonomous power supply sources capable of operating in extreme weather conditions is one of the promising directions in microelectronics. Thermoelectric generators (TEG) based on the Seebeck effect are of great interest. At present, heat sources

based on nanopowders of energy compositions compressed into pellets used for the "hot" side of thermoelectric generators [1] have a number of disadvantages. Such pellets in the form of a disk [2] after pressing have increased fragility, since they do not have a binder in the mixture, and when placed on the surface of the TEG, the efficiency of heat transfer decreases due to point contact.

The key solution to this problem is the development of a technology for obtaining a stable dispersion of energy-saturated materials of the required viscosity and the deposition of the material directly on the surface of a heat-conducting substrate or the surface of a TEG using additive printing. Due to the tight and durable contact of the energy-saturated material on the surface of the TEG, the energy efficiency and reliability of the system will increase. The dispersion was based on Al/Ni/$Fe_3O_4$ nanopowder and isopropyl alcohol. However, in order to achieve the key mechanochemical properties of the dispersion, it is necessary to solve a number of technological problems associated with obtaining a uniform coating and the elimination of cracking of the material after drying, and it is also necessary to achieve reliable adhesion between the layers of the obtained material and the surface of the TEG.

To create a uniform coating, we used multi-walled carbon nanotubes, which, being distributed over the volume of the dispersion, create a retaining framework for nanoparticles. To improve the adhesion of the layer to the surface, Pattex Classic glue was used, which, after drying, provides reliable adhesion to the surface, as well as additional protection from moisture. The dispersions were applied using a Nordson robot dispenser, which allows you to control the amount of applied material per unit area. The formed layers of the energetic material after drying contain no more than 5 wt.% functional additives that bind 95 wt.% of nanopowders.

The technology of applying a uniform heat-generating layer with reliable adhesion to the substrate makes it possible to obtain energy-efficient heat sources, and, due to additive printing, to achieve scaling and automation of the technological process of forming heat-generating elements for a number of thermoelectric devices.

***The reported study was funded by RFBR, project number 20-32-90219.***

**References**

1. Nemtseva S., Lebedev E., Lazarenko P., Gavrilov S., Gromov D., Shaman Yu., Ryazanov R. Nano-sized Al-Ni energetic powder material for heat release element of thermoelectric device // Journal of Physics: Conference Series. 2018. — Vol. 1124. P. 081027.
2. Pereverzeva S. Yu., Lebedev E. A. et al. Application of thermite mixtures of composition Al-Ni-$Fe_3O_4$ in thermoelectric energy converters // Collection of Scientific Materials of XVII All-Russian with International School — Seminar on Structural Macrokinetics for Young Scientists named after Academician A. G. Merzhanov, 2019. P. 52–53.

УДК 543.544.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.504.505

# Исследование метрологических свойств детектора по теплопроводности на интегральной основе в условиях капиллярной газовой хроматографии

## Investigating Metrological Properties of an Integral Thermal Conductivity Detector Under Conditions of Capillary Gas Chromatography

**Платонов В. И.[1], Платонов И. А.[1], Поздняков М. М.[2], Чиненков М. Ю.[2], Дюжев Н. А.[2]**
*[1] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева*
*443086, г. Самара, Московское ш., 34*
*rovvv@yandex.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*evsikov.ilija@yandex.ru*

**Platonov V. I.[1], Platonov I. A.[1], Pozdnyakov M. M.[2], Chinenkov M. Yu.[2], Dyuzhev N. A.[2]**
*[1] Samara National Research University*
*34 Moskovskoe Hwy., Samara, 443086*
*rovvv@yandex.ru*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*evsikov.ilija@yandex.ru*

Проведено экспериментальное исследование метрологических свойств детектора по теплопроводности для газовой хроматографии с использованием датчика потока газа, изготовленного в Национальном исследовательском университет «МИЭТ», в качестве чувствительного элемента. Показано повышение чувствительности и снижение инерционности относительно существующих коммерчески доступных аналогов.
**Ключевые слова:** МЭМС; детектор по теплопроводности; газовая хроматография.

The paper presents an experimental study of the metrological properties of a thermal conductivity detector for gas chromatography have been carried out using a gas flow sensor manufactured by MIET as a sensitive element. An increase in sensitivity and a decrease in inertia have been shown relative to existing commercially available analogues.
**Keywords:** MEMS; thermal conductivity detector; gas chromatography.

За последние годы в мире резко возрос интерес к созданию микроприборов на основе микрофлюидных и микроэлектромеханических систем для аналитической химии. Они используются в качестве детекторов [1], предварительных концентраторов [2] и разделительных хроматографических колонок [3]. Такие устройства

позволяют уменьшить габариты и вес аналитических приборов, сократить время анализа, а также повысить чувствительность прибора.

В представленной работе проведено экспериментальное исследование метрологических свойств детектора по теплопроводности для газовой хроматографии с использованием датчика потока газа, изготовленного в Национальном исследовательском университет «МИЭТ», в качестве чувствительного элемента. Показано повышение чувствительности и снижение инерционности по отношению к исследованному аналиту (углекислому газу) относительно существующих коммерчески доступных аналогов.

***Литература***

1. Marquis B. T., Vetelino J. F. A semiconducting metal oxide sensor array for the detection of NOx and $NH_3$ // Sensors and Actuators B: Chemical 77 (2001) 100–10.
2. Tian W. C., Chan H. K. L., Chia S. W., Zellers E. T. Multiple-stage microfabricated preconcentrator–focuser for micro gas chromatography system // IEEE Journal of Microelectromechanical Systems 14 (2005). P. 498–507.
3. Ali S., Khorassani M. A., Taylor T. L., Agah M. MEMS-based semi-packed gas chromatography columns // Sensors and Actuators B 141 (2009). P. 309–315.

In recent years, the world has shown keen interest in the creation of microdevices for analytical chemistry, based on microfluidic and microelectromechanical systems. They are used as detectors [1], pre-concentrators [2] and separation chromatographic columns [3]. Such devices make it possible to reduce the size and weight of analytical instruments, shorten the analysis time, and increase the sensitivity of the instrument.

In the presented work, an experimental study of the metrological properties of a thermal conductivity detector for gas chromatography was carried out using a gas flow sensor manufactured by MIET as a sensitive element. An increase in sensitivity and a decrease in inertia with respect to the investigated analyte (carbon dioxide) relative to existing commercially available analogs have been shown.

***References***

1. Marquis B. T., Vetelino J. F. A semiconducting metal oxide sensor array for the detection of NOx and $NH_3$ // Sensors and Actuators B: Chemical 77 (2001) 100–10.
2. Tian W. C., Chan H. K. L., Chia S. W., Zellers E. T. Multiple-stage microfabricated preconcentrator–focuser for micro gas chromatography system // IEEE Journal of Microelectromechanical Systems 14 (2005). P. 498–507.
3. Ali S., Khorassani M. A., Taylor T. L., Agah M. MEMS-based semi-packed gas chromatography columns // Sensors and Actuators B 141 (2009). P. 309–315.

УДК 538.975 + 621.316.849 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.506.507

# Технология формирования многослойной структуры Cu-Sn для герметизации МЭМС на уровне пластины

## The Forming Technology for a Cu-Sn Multilayer Structure for Sealing MEMS at the Plate Level

**Грабов А. В., Суздальцев С. Ю., Рискин Д. Д., Обижаев Д. Ю., Турков В. Е., Жукова С. А.**
*ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»*
*115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а*

**Grabov A. V., Suzdal'tsev S. Yu., Riskin D. D., Obizhayev D. Yu., Turkov V. Ye., Zhukova S. A.**
*FSUE "CNIIHM"*
*16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487*

Разработан электрохимический процесс формирования SLID-структуры Cu-Sn для герметизации МЭМС по технологии WLP, совместимый с фотолитографическими процессами и отличающийся наличием финишного электрохимического глянцевания. Исследовано дендритообразование и методы его предотвращения, а также механизмы диффузии Sn в Cu и рост интерметаллидов.

**Ключевые слова:** WLP; SLID; МЭМС; гальваника; бондинг.

Система Cu-Sn является распространенной многослойной системой для сборки МЭМС-устройств при вакуумной герметизации на уровне пластин (WLP), поскольку слои Cu-Sn обеспечивают стабильное вакуумно-плотное соединение пластин при формировании SLID (взаимодиффузного твердого раствора) [1]. Целью работы являлось усовершенствование электролитических методов формирования SLID-системы Cu-Sn, совместимых с имеющимися фотолитографическими процессами на кремниевых пластинах диаметром 100 мм, исключающих использование цианидных и пирофосфатных электролитов.

Было проведено экспериментальное исследование десяти составов кислотных электролитов омеднения и составов электролитов лужения по следующим параметрам: плотность осадка, пористость, скорость осаждения, пороговая плотность тока дендритообразования, фазовый состав металла, характеристический размер зерна, шероховатость, разброс толщины слоя. Обнаружено, что для Cu наилучшее сочетание параметров дает электролит на основе $Cu(BF_4)_2$ ~750 г/л. Дендритообразование не наблюдается при плотности тока осаждения ~10 А/дм$^2$, продолжительности процесса $\tau$~20 мин, толщине слоя $h_{Cu}$ = 10 мкм. При этом для снижения шероховатости слоя Cu была использована операция финишного глянцевания в промышленном электролите типа «Испано-Сюиза» ($H_3PO_4$:$CrO_3$ 10:1, RT, 1–3 А/дм$^2$). Обнаружено, что для Sn наилучшее сочетание параметров и наибольшее время жизни (до 12 дней) имеет электролит на основе тиокарбамидного комплекса $Sn^{2+}$ (0,02 Мв 1 М р-р $H_2SO_4$). В этом электролите при плотностях тока ≤0,5 А/дм$^2$ происходит 2D- зародышеобразование, а при превышении тока возникают градиенты поверхностного потенциала (grad($\varphi_S$)) и происходит переход

к 3D- зародышеобразованию [2]. Кроме того, для устранения вероятности дендритообразования на начальной стадии процесса, когда из-за разницы проводимостей Cu и Sn возникают дополнительные grad($\varphi_S$), пластины предварительно выдерживались в электролите при токе 0,05 А/дм$^2$ в течение 10–15 мин. На заключительной стадии процесса лужения проводилась операция финишного глянцевания Sn (водный р-р $NaNO_3$ 1,5 М с добавкой $Na_3PO_4$i = 0,5 А/дм$^2$).

Было проведено исследование сформированных слоев методом электронной микроскопии сколов образцов Cu-Sn на кремнии после их термического отжига при различной температуре и продолжительности процесса. Определены скорости роста интерметаллидов Cu-Sn в условиях инфракрасного нагрева пластин кремния в вакууме.

На основании полученных экспериментальных результатов разработан электрохимический процесс формирования SLID-структуры Cu-Sn для герметизации МЭМС по технологии WLP, совместимый с фотолитографическими процессами.

***Литература***

1. Munding A., Hubner H., Kaiser A., Penka S., Benkart P. and Kohn E. Cu/Sn Solid-Liquid Interdiffusion Bonding. In Wafer Level 3-D ICs Process Technology. © 2008 Springer Science+Business Media, LLC.
2. Luu T.T. Solid-Liquid Interdiffusion wafer-level bonding for MEMS packaging.Doctoral Thesis. Buskerud and Vestfold University College. 2015.

УДК 621.389 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.508.509

# Надежное высокотемпературное вакуумплотное соединение многослойной LTCC-керамики и металла

## Reliable High Temperature Vacuum Compound of Multilayer LTCC Ceramics and Metal

**Косевской В. А., Скрынник Е. А., Бородаев А. В.**
*АО НПЦ «СпецЭлектронСистемы»*
*125319, г. Москва, а/я 59, Волгоградский просп., 42, корп. 5*
*kosevskoy@npc-ses.ru*

**Kosevskoy V. A., Skrynnik Ye. A., Borodayev A. V.**

В докладе представлены результаты изготовления высокотемпературных вакуумплотных соединений керамики низкотемпературного обжига (LTCC) с металлическими деталями датчиков, предназначенных для функционирования в условиях внешних температур до 300 °С. На реальных примерах продемонстрирована необходимость учета специфических свойств соединяемых материалов и их поведения в ходе выполнения технологических операций по сборке датчиков.
**Ключевые слова:** LTCC (низкотемпературная совместно обжигаемая керамика); многослойная керамическая структура; металлокерамический узел.

Соединения керамики с металлом находят широкое применение в микроэлектронике, электротехнике, атомной энергетике и др. отраслях промышленности. К параметрам металлокерамических конструкций предъявляются определенные требования: механическая и динамическая прочность, повышенная термостойкость и широкий диапазон рабочих температур, вакуумная плотность, высокие электроизоляционные свойства и т. д. Технология низкотемпературной керамики совместного обжига (LTCC) отвечает указанным требованиям для создания электромеханических узлов, таких как, например, датчики давления [1]. Для изготовления ответственных металлокерамических соединений применяют различные технологические способы, основным из которых является высокотемпературная пайка. Существенной проблемой при пайке керамики с металлом является большая разница коэффициентов термического линейного расширения, вследствие чего в процессе охлаждения после пайки возможно образование трещин в паяном соединении.

Изготовление металлокерамических узлов рассмотрено на примере сборки датчика давления на базе соединения LTCC-коллектора с титановой втулкой, у которой на область контакта одним из общеизвестных способов предварительно было нанесено серебро (рис. 1).

Процесс соединения коллектора и титановой втулки высокотемпературной пайкой классическим способом использования припоев ПСр (серебро) не обеспечил положительного результата. Все образцы, соединенные этим способом, показали после пайки уровень натекания при измерении гелиевым течеискателем ~$10^{-9}$ мбар·л/с. В результате проведения испытаний на термоудар и термоциклирование все образцы потекли.

Для решения задачи авторы доклада решили использовать метод эвтектической пайки [2], рекомендованный компанией — производителем систем LTCC — DuPont. В составе продуктов, предлагаемых этой компанией, присутствует система

паст «брэйзинг», предназначенных для присоединения к керамическим LTCC-платам металлических элементов. В ходе выполнения исследований была разработана и изготовлена специализированная оснастка из высокоплотного графита, позволяющая с высокой точностью удерживать зазор между соединяемыми деталями и компенсирующая изменения этого зазора при термическом расширении деталей в процессе пайки. Соединяемые детали размещались в графитовой оснастке на заданном расстоянии и помещались в печь вакуумной пайки SST 3130, в которой и происходил процесс пайки при температуре 280–300 °C.

**Рис. 1.** Пример металлокерамического узла высокотемпературного герметичного датчика на основе спая многослойного LTCC керамического коллектора и титановой втулки

В результате выполнения перечисленных операций 80 % образцов соединяемых деталей оказались пригодными для дальнейшего использования. Проведенные испытания на герметичность посредством гелиевого течеискателя показали, что паяные образцы металлокерамических узлов герметичны и обеспечивают скорость натекания ~$10^{-9}$ мбар·л/с. Образцы, изготовленные таким методом, были подвергнуты термоциклированию и многократному термоудару (+185 °C / −5 °C). Изменения параметров натекания отмечено не было, что свидетельствует о высокой устойчивости узла к воздействию высоких температур и надежному вакуумплотному соединению его деталей. Кроме того, несколько спаянных узлов методом индукционной сварки были присоединены к внешним металлическим подводящим трубкам для подключения датчика давления. Повышение температуры узла в процессе сварки (ориентировочно выше 350 °C) не привело к нарушению герметичности, что свидетельствует об эффекте «упрочнения» паяного эвтектического соединения в процессе нагрева до температур, превышающих температуру пайки и косвенно подтверждающих работоспособность узла при температурах 250–300 °C.

***Литература***

1. Schilm J., Goldberg A., Partsch U., Dürfeld W., Arndt D., Pönicke A. and Michaeli A. Joining technologies for a temperature-stable integration of a LTCC-based pressure sensor. URL: www.j-sens-sens-syst.net/5/73/2016.
2. “DuPont™ GreenTape™ low temperature co-fired ceramic system”. URL: www.mcm.dupont.com.

УДК 544.6.076 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.510.511

# Компенсация температурного ухода характеристик электрохимических преобразователей

## The Temperature Shift Compensation for the Electrochemical Converters Characteristics

**Криштоп В. Г.**[1,2]
*[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*
*[2] ООО «Сейсмотроника»*
*127204, г. Москва, Долгопрудненское ш., 3*
*krishtop@iptm.ru*

**Krishtop V. G.**[1,2]
*[1] Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia*
*[2] Seismotronics LLC*
*3 Dolgoprudnenskoye Hwy., Dolgoprudny, 141700*
*krishtop@iptm.ru*

В данной работе исследуется изменение характеристик электрохимических преобразователей параметров движения (ЭХП) в зависимости от температуры и обсуждаются методы температурной компенсации характеристик.

**Ключевые слова:** сенсоры; электрохимические микросистемы; планарный электрохимический преобразователь; нелинейные эффекты; передаточная функция; диффузионный перенос.

Электрохимические преобразователи (ЭХП) механических величин широко используются для регистрации механических сигналов в акустическом и инфразвуковом (сейсмическом) диапазоне частот — колебаний давления, переменного ускорения, вращательного ускорения, колебательной скорости. Основное преимущество ЭХП перед прочими датчиками механических величин — высокая чувствительность и низкий уровень собственных шумов на инфразвуковых частотах.

ЭХП представляет собой набор микроэлектродов с различной геометрией, размещенный в объеме высокоактивного электролита. Как правило, на электродах постоянно присутствует постоянное опорное напряжение и протекает электрохимический ток, обусловленный диффузионным переносом ионов между электродов. Внешнее механическое движение приводит к принудительному перемешиванию жидкости и включению дополнительного механизма доставки ионов от электрода к электроду — конвективного переноса [1–3]. В электролитических магнитогидродинамических (МГД) преобразователях вместо опорного напряжения используется постоянное магнитное поле, а инерциальное перемешивание электролита приводит к дополнительному магнитогидродинамическому току [4, 5]. Также возможно использовать электрокинетический эффект.

При использовании ЭХП всегда следует учитывать существенную зависимость характеристик от температуры. В данной работе исследуется изменение характеристик ЭХП в зависимости от температуры и обсуждаются методы температурной компенсации характеристик. Обсуждаются преимущества и недостатки традиционных подходов, рассматриваются модели температурного поведения ЭХП и предлагаются новые методы температурной компенсации, применение которых становятся возможно в том числе благодаря развитию микроэлектронной технологии производства ЭХП [6].

Результаты данной работы применимы при проектировании и производстве приборов и систем на основе ЭХП.

***Литература***


1. Krishtop V. G. et al. Technology and application of electrochemical motion sensors // Advanced Materials Proceedings, 2019. Vol. 4. Issue 1. P. 03–06. DOI: 10.5185/amp.2019.1449.
2. Криштоп В. Г. и др. Технология и применение электрохимических преобразователей // Наноиндустрия, 2020. — № 96. — С. 450–455. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.450.455.
3. Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Егоров И. В. Сейсмические датчики на принципах молекулярно-электронного переноса в твердотельных и жидкостных микроструктурах // Приборы и системы разведочной геофизики, 2013. — Т. 43. — № 1. — С. 39–49.
4. Криштоп В. Г., Дудкин П. В., Жевненко Д. А., Криштоп Т. В. Планарные магнитогидродинамические электрохимические преобразователи // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-2 (102). — С. 552–555. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.552.555.
5. Дудкин П. В. и др. Планарный электрохимический магнитогидродинамический акселерометр // Наноиндустрия, 2020. — № 96. — С. 407–410. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.407.410.
6. Novikov A. V., Egorchikov A. E., Dolgov A. N., Gornev E. S., Popov V. G., Egorov I. V., Krishtop V. G. The planar silicon-based microelectronic technology for electrochemical transducers // Proc. SPIE 10224, ICMNE-2016, 102241J (2016); doi:10.1117/12.2267095.

УДК 621.3.049.76 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.512.515

# Исследование процессов герметизации и химико-гальванической металлизации наполненных эпоксидных смол для трехмерных микросборок с торцевой коммутацией

## Research on Filled Epoxy Resins Encapsulation and Chemical-Galvanic Metallization Process for Three-dimensional Packages with Edge Commutation

**Беляков И. А.[1], Вертянов Д. В.[1,2], Сидоренко В. Н.[2], Погудкин А. В.[1], Тимошенков С. П.[1]**

*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*[2] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*igor-terra@yandex.ru, vdv.vertyanov@gmail.com, vitaly@microsborka.ru, a.pogudkin@mail.ru*

**Belyakov I. A.[1], Vertyanov D. V.[1,2], Sidorenko V. N.[2], Pogudkin A. V.[1], Timoshenkov S. P.[1]**

*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*[2] Zelenograd Nanotechnology Center JSC*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*vdv.vertyanov@gmail.com, vitaly@microsborka.ru, a.pogudkin@mail.ru, igor-terra@yandex.ru*

Рассмотрены варианты герметизации трехмерных микросборок с торцевой коммутацией. Изучено влияние структуры торцевых поверхностей после герметизации на качество формируемой на этих поверхностях меди. Исследованы различные растворы и процессы медной металлизации, а также варианты подготовки поверхности перед металлизацией. Получены результаты адгезии меди к эпоксидному компаунду для разных растворов меднения и способов подготовки поверхности.

**Ключевые слова:** трехмерные сборки; торцевая металлизация; металлизация компаундов; герметизация; корпусирование.

The paper considers encapsulation methods for three-dimensional packages with edge commutation. Besides, it studies the influence of edge surfaces structure after encapsulation on the copper plated quality for these surfaces. Various solutions and processes of copper metallization as well as methods of surface treatment before plated have been researched. Results of adhesion between copper and epoxy based compound for various electroless plating solutions and various surface treatments have been obtained.

**Keywords:** 3D packaging; board-edge metallization; compound metallization; encapsulation; advanced packaging.

Трехмерные микросборки используются в изделиях различного назначения и уровня сложности. Наиболее сложные микросборки изготавливаются непосредственно в ходе производства кристаллов с применением дорогостоящих технологий

микроэлектроники, таких как сращивание пластин, атомно-слоевое наращивание и создание отверстий в кремнии. Однако существует большая группа менее дорогостоящих и более гибких технологий интеграции, позволяющих включать в трехмерные микросборки готовые корпусные микросхемы и кристаллы, пассивные компоненты, а также другие микросборки с минимальным вовлечением процессов кристального производства. К числу таких технологий относятся интеграция «корпус на корпусе» (3D WLP) и внутренний монтаж. Отличительной особенностью указанных технологий является то, что вместо отверстий в кремнии, соединяющих уровни, вертикальная коммутация в них создается на поверхности или в объеме герметизирующего сборку компаунда в виде вертикальных торцевых дорожек или отверстий в компаунде соответственно [1, 2].

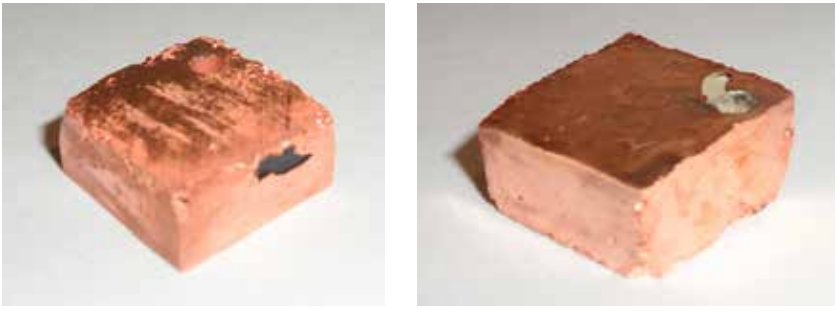
В роли композиционного диэлектрика для герметизации микросборок, изготовленных по технологиям внутреннего монтажа и интеграции «корпус на корпусе», чаще всего выступают наполненные частицами оксида кремния эпоксидные смолы [3]. Это могут быть смолы низкой вязкости для подкристальной заливки (underfill), более вязкие заливочные компаунды или порошкообразные композиции для опрессовки кристалла в корпус. В случае с технологиями Fan-out WLP (корпусирование кристаллов на уровне пластины по методу внутреннего монтажа) обычно используется опрессовка порошкообразным монолитизирующим компаундом (EMC — epoxy mold compound). В таких микросборках коммутация чаще всего реализуется посредством отверстий в компаунде, заполненных проводящим материалом или покрытых слоем металлизации [1]. Вариант с металлизацией отверстий получил большее распространение благодаря технологии InFo от TSMC [4].

Менее вязкие эпоксидные композиции обычно применяются для создания монолитных микросборок, например, при герметизации многоуровневых структур, состоящих из смонтированных друг на друга при помощи бампов коммутационных плат (интерпозеров). Также эпоксидные композиции низкой вязкости применяют в сборках с торцевой коммутацией (технологии 3D PLUS и Irvine Sensors [2, 5]), где соединяющие уровни коммутационные дорожки формируется на торцевых поверхностях сборки.

В целом используемые для герметизации микросборок компаунды сходны по составу с материалами печатных плат, поэтому при их металлизации можно применять аналогичные подходы. Однако структура стеклоткани в композитах для плат отличается от структуры мелкозернистого наполнителя в микросборках. Отличаются также количество наполнителя и шероховатость поверхности изделия. Кроме того, в печатных платах металлизируются, как правило, только отверстия в диэлектрике, находящиеся между двумя слоями медной фольги, тогда как в микросборке с торцевой коммутацией металлизацию необходимо сформировать по всей поверхности изделия. Перечисленные особенности важно учитывать как при выборе методов герметизации (поскольку способ герметизации непосредственно влияет на пористость и шероховатость поверхности композита), так и при определении способа металлизации и подготовки поверхности.

В ходе данного исследования установлено, что высокая пористость компаунда, так же как и высокая шероховатость, негативно сказываются на качестве металлизации (рис. 1*а*). Однако гладкая поверхность также имеет плохую адгезию к осаждаемой меди (рис. 1*б*). В результате необходимо обеспечить оптимальный уровень шероховатости поверхности при отсутствии пористости материала. Сделать это

можно только в том случае, если используемый метод заливки позволяет избежать захвата воздушных пузырьков, а применяемая для герметизации сборок форма изначально имеет достаточно ровные стенки. В ходе экспериментов в данной работе рассматривались различные методы заливки и дегазации эпоксидных композитов, а также применялись различные формы. По результатам экспериментов установлено, что дегазация и применение шприца при заливке компаунда в форму не дают положительных результатов (остаются пузырьки на поверхности смолы), тогда как ультразвуковая обработка и отверждение смолы под давлением, напротив, минимизируют количество пузырьков на поверхности.



*а* *б*

**Рис. 1.** Дефекты металлизации образцов из эпоксидного компаунда: *а*) на торцевых гранях заготовки с высоким уровнем шероховатости; *б*) на верхней грани заготовки с гладкой поверхностью для компаундов, наполненных соответственно оксидом кремния, карбонитридом титана и нитридом кремния

Также неоднородность поверхности и значительное количество пузырьков могут быть следствием ребристых стенок формы, например, если она была выполнена трехмерной термопечатью (FDM) — в этом случае стенки имеют волнистую структуру, обусловленную большой толщиной печатного слоя. Более ровные стенки удается получить трехмерной печатью фотополимером, толщина слоя в этом случае может равняться 10 мкм, при этом границы слоев менее четкие по сравнению с термопечатью. Поэтому в рамках данной работы формы для заливки образцов изготавливались путем заливки в напечатанную из фотополимера форму термостойкого силикона. Силикон выбран из-за своих пластичных свойств, низкой адгезии к эпоксидной смоле и при этом характеризуется достаточно высокой термостойкостью (до 250–300 °C) в случае применения материала на платиновом катализаторе. Это позволяет производить отверждение в форме почти всех доступных эпоксидных смол (в частности, некоторые новолачные смолы требуют отверждения при 220 °C), а кроме того, облегчает извлечение отвержденных образцов.

При исследовании процессов формирования медного покрытия в работе установлено, что технологии прямой металлизации дают нестабильный результат при получении сплошного покрытия на диэлектрике. Причина этого в том, что рост металла в данных технологиях осуществляется гальваническим методом по сформированной в результате активирования пленке графита, палладия или электроактивного полимера. Рост происходит от катодного контакта и распространяется

планомерно в противоположную контакту точку образца. Как результат, в области, прилегающей к катоду, слой металла толще, чем в областях, удаленных от точки контакта. Решением проблемы является использование химической металлизации, которая формируется по всей поверхности образца. Однако проблема данного способа в том, что при одновременном формировании покрытия на всей поверхности в слое возникают напряжения и результирующая адгезия металла к полимеру может оказаться слишком низкой. В рамках работы предлагается решить данную проблему путем предварительной обработки заготовок (до активирования) в растворах, формирующих на поверхности образцов активные связи. Так, в данной работе исследовалось влияние на адгезию меди предварительной обработки в растворах КАРО, дихромата калия и эпоксисилана. При этом в качестве активатора применялась палладиевая система прямой металлизации, позволяющая получать более толстый слой по сравнению с активированием, используемым для химического наращивания меди.

***Литература***

1. Heterogeneous Integration Roadmap. Chapter 23: Wafer Level Packaging (электронный ресурс)/ IEEE, 2019. URL: https://eps.ieee.org/images/files/HIR_2019/HIR1_ch23_WLP.pdf.
2. Wayne Johnson R. 3-D Packaging: A Technology Review / R. Wayne Johnson, Mark Strickland, David Gerke, NASA, 2005. 70 p.
3. Lu D. Materials for Advanced Packaging / Daniel Lu, C. P. Wong. Springer, 2017. P. 350–418.
4. Lau J. H. Fan-Out Wafer-Level Packaging. Springer, 2018. P. 211–216.
5. Gutmann R. J., Lu J.-Q., Kwon Y., McDonald J. F. and Cale T. S. Three-dimensional (3D) ICs: A Technology Platform for Integrated Systems and Opportunities for New Polymeric Adhesives // IEEE, Applications in Advanced packaging, 2001. P. 173–180.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90096.***

УДК 621.3.049.76 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.516.519

# Технологические процессы формирования бессвинцовых шариковых выводов на отдельных кристаллах с алюминиевыми контактными площадками

## Technological Processes of Lead-free Bump Making on Discrete Chips with Aluminum Pads

**Сидоренко В. Н.[1], Вертянов Д. В.[1,2], Беляков И. А.[2]**
*[1] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*vitaly@microsborka.ru, vdv.vertyanov@gmail.com, igor-terra@yandex.ru*

**Sidorenko V. N.[1], Vertyanov D. V.[1,2], Belyakov I. A.[2]**
*[1] Zelenograd Nanotechnology Center JSC*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Рассмотрены способы формирования слоев металлизации Ni-Au под шариковые выводы на отдельных кристаллах после разделения пластины. Описаны особенности, имеющие место при установке на площадки кристаллов с покрытием Au-Ni бессвинцовых шариковых выводов. Приведены результаты исследований адгезии покрытия после установки шарика на сдвиг.
**Ключевые слова:** шариковый вывод; монтаж методом перевернутого кристалла; металлизация под бампы; корпусирование; микросборка.

This study considers methods of Ni-Au metallization layers making for bumps on discrete chips with aluminum pads after wafer singulation. Besides, it highlights features that occur when lead-free bumps are made on chip pads with Au-Ni coating. Also the study presents results of Au-Ni coating shear adhesion for aluminum chip pads after bump making.
**Keywords:** bump; flip-chip; under-bump metallurgy; advanced packaging; microassembly.

В технологиях монтажа методом перевернутого кристалла (flip-chip) для обеспечения адгезии шариковых выводов на контактных площадках формируют дополнительные слои металлизации, называемые UBM (Under-Bump Metallurgy). Существует множество вариантов UBM, разработанных различными компаниями под различные технологии flip-chip. Так, для одной из наиболее известных технологий создания бампов под названием C4 (Controlled-Collapse Chip Connection) от IBM используются покрытия Cr/Cr-Cu/Cu или TiW/Cu/Au, получаемые методом вакуумного осаждения [1].

Изначально C4 была разработана для свинецсодержащих бампов. Однако ее модификации (с той же структурой слоев металлизации) используются и для шариков из бессвинцового припоя. Тем не менее из-за более высокой температуры оплавления и большего содержания олова бессвинцовые припои, согласно [2, 3],

более склонны к поглощению меди из слоев металлизации. Как результат, при определенной концентрации меди в припое на границе шарика и медного слоя UBM может образоваться слой интерметаллидов Cu-Sn с пустотами внутри [3]. Для решения проблемы были разработаны варианты UBM на основе никеля, интерметаллиды которого с оловом образуются при более высоких температурах. Среди таких систем покрытия NiV/Cu, TiW/NiV [4], а также химически осаждаемое покрытие Zn/Ni/Au.

Особенностью покрытия Zn/Ni/Au является возможность его формирования на алюминиевых контактных площадках отдельных кристаллов уже после разделения пластины. Кроме того, покрытие осаждается только на активированные области металла, не разрастаясь в стороны от контактной площадки. Это позволяет использовать его для кристаллов с малым шагом площадок.

Первым этапом формирования системы Zn/Ni/Au является процесс цинкования, в ходе которого на активированной поверхности алюминия, освобожденной от оксида, осаждается тонкий (порядка десятков нанометров) слой цинка. Чтобы удалить оксид, присутствующий на поверхности алюминия, цинкование производят в щелочных растворах. При этом слой цинка, сформированный после первого цинкования, имеет неровную поверхность из-за различной толщины оксида в разных частях исходной алюминиевой площадки. В связи с этим первый слой цинка часто стравливают в разбавленной азотной кислоте, после чего проводят второе цинкование. Иногда процесс удаления и наращивания цинка повторяют третий раз [5]. Однако каждое цинкование вместе с оксидом частично удаляет алюминий с площадки. Замедлить процесс травления алюминия можно путем добавления небольшого количества данного металла в раствор цинкатной обработки. Также следует отметить, что в растворах, содержащих только щелочь и оксид цинка, цинкование идет достаточно быстро, что может приводить к получению неплотных слоев. Снизить скорость реакции можно путем добавления специальных модификаторов [5]. В рамках данной работы исследовалось влияние состава раствора и времени цинкования, а также количества цинкатных обработок на адгезию покрытия. Исследования проводились на рабочих кристаллах интегральных схем с алюминиевыми площадками (толщина алюминия более 1 мкм) и органическим защитным покрытием.

Тип диэлектрического покрытия кристалла является важным фактором при выборе состава раствора для осаждения Zn/Ni/Au, поскольку защитные покрытия имеют различную устойчивость в кислотных и щелочных средах. Наиболее критичным является воздействие на диэлектрик щелочи в процессе цинкования, концентрация которой может превышать 30 % в различных вариантах растворов. Известно, что к щелочной среде низкую устойчивость имеют покрытия кристаллов на основе стекол, и в особенности органические покрытия на основе полиимида. Однако точные составы покрытий могут отличаться, а вместе с составом отличается и реакция диэлектрика на воздействие агрессивной химии. Например, различные типы полиимидных пленок, применяемых в электронике, имеют разную устойчивость к щелочам: некоторые растворяются в концентрированных растворах (более 30 %) только при нагреве, другие начинают разрушаться уже при температуре порядка 25 °C.

Следующим после цинкования этапом является формирование слоя химического никеля и иммерсионное золочение (рис. 1). Осаждение никеля происходит

только на участках, покрытых цинком. При этом скорость роста, как показывают проведенные исследования, сильно зависит от времени обработки в растворе цинкования. Чем меньше время обработки, тем ниже скорость осаждения никеля. Однако при малом времени цинкования на площадках остается оксид алюминия, что ведет к отслоению металлизации. Длительная же цинкатная обработка приводит к слишком быстрому осаждению, результатом которого является пористое темное покрытие, которое также имеет плохую адгезию к площадке кристалла. Кроме того, при длительном цинковании возможно активирование торцевых поверхностей кристалла, которые могут покрыться слоем Zn/Ni/Au. По этой причине в работе исследовалось, в том числе, влияние времени цинкования на адгезию формируемого покрытия Ni.

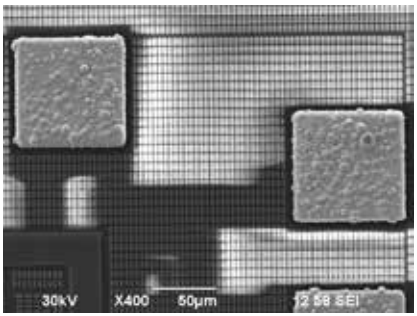



**Рис. 1.** РЭМ-изображение контактных площадок кристалла после осаждения структуры Zn/Ni/Au

Химическое никелирование может выполняться из различных растворов, в которых применяются различные восстановители. Тем не менее при осаждении покрытия Zn/Ni/Au чаще всего используются растворы на основе гипофосфитов. Осаждаемый из этих растворов никель содержит значительную долю фосфора (от 20 % и выше), поэтому часто говорят о слое NiP в структуре системы Zn/Ni/Au. При большом содержании фосфора формируемое покрытие характеризуется более низкой адгезией к слою цинка, относительно низкой проводимостью и низкой механической прочностью. Уменьшить содержание примеси в никеле можно путем использования других восстановителей вместо гипофосфита, что также исследовалось в рамках работы.

Необходимо отметить, что слой NiP, формирующийся на площадках, находится в напряженном состоянии. Нагрев, имеющий место при формировании шариков, как установлено в работе, часто приводит к разрушению подобных напряженных слоев и отрыву шарика сразу после его формирования. Потому на завершающем этапе исследования изучалось влияние предварительной термообработки на адгезию покрытия Zn/Ni/Au после формирования на нем шарикового вывода из оловянно-серебряного бессвинцового припоя (рис. 2). Термообработка производилась на кристаллах с полностью сформированным покрытием UBM перед установкой бампов на контактные площадки.

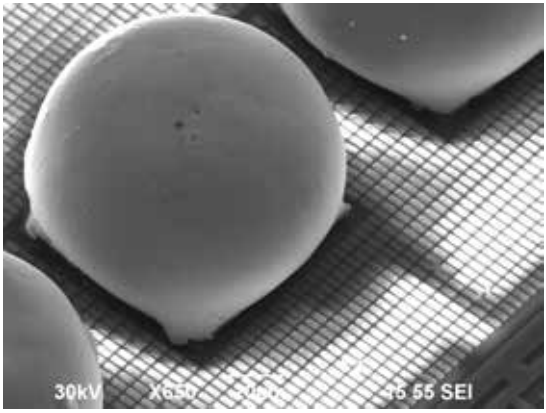



**Рис. 2.** РЭМ-изображение контактных площадок кристалла со структурой Zn/Ni/Au после установки бессвинцовых бампов SAC305 с исходным диаметром 100 мкм

Итоговое исследование адгезии шариковых выводов к площадкам проводилось методом сдвига с измерением силы, необходимой для отрыва шарика или разрушения площадки. По результатам проведенных экспериментов установлены оптимальные режимы и растворы для формирования покрытия Zn/Ni/Au на одиночных кристаллах кремниевых интегральных схем. Изучено влияние состава растворов цинкования и никелирования на диэлектрическое покрытие кристаллов. Также выявлено влияние температурной обработки перед установкой шариков на адгезию шариковых выводов к площадкам кристалла.

***Литература***

1. John H Lau. Recent Advances and New Trends in Flip Chip Technology // Journal of Electronic Packaging. № 138. 2016. 23 p.
2. Md Arshad M. K., Hashim U., Isa Muzamir. Under Bump Metallurgy (Ubm)-A Technology Review For Flip Chip Packaging M. K. Md Arshad // International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), 2007. Vol. 2. № 1. P. 48–54.
3. Ho-Ming Tong, Yi-Shao Lai, Wong C. P. Advanced Flip Chip Packaging: Reaction of Lead-Free Solders with Cu-Based Pads. Springer, 2013. P. 510–523.
4. Se-Young Jang, Juergen Wolf, Woon-Seong Kwon, Kyung-Wook Paik. UBM (Under Bump Metallization) Study for Pb-Free Electroplating Bumping: Interface Reaction and Electromigration // Electronic Components and Technology Conference, 2002. 8 p.
5. Мамаев В. И. Функциональная гальванотехника: учебное пособие. — Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. — С. 119–126.

УДК 62-408 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.520.521

# Технология временного бондинга для переноса знаков совмещения на тонких пластинах

## Temporary Bonding Technology for Transferring Registration Marks on Thin Wafers

**Дюжев Н. А.[2], Гусев Е. Э.[1], Махиборода М. А.[1], Машевич П. Р.[2], Иванин П. С.[2], Фомичёв М. Ю.[2]**
*[1] ООО «Сенсор-Микрон»*
*bubbledouble@mail.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Djuzhev N. A.[2], Gusev E. E.[1], Makhiboroda M. A.[1], Mashevich P. R.[2], Ivanin P. S.[2], Fomichev M. U.[2]**
*[1] "Sensor-Mikron" LLC*
*bubbledouble@mail.ru*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Предложен инновационный подход для переноса знаков совмещения на тонких пластинах. Реализация подхода осуществляется посредством технологии временного бондинга. В пластине-носителе были сделаны «смотровые окна» для сканирования знаков совмещения на рабочей пластине. При помощи двухсторонней литографии и плазмохимического травления был сделан массив TSV-структур.
**Ключевые слова:** временный бондинг; прогиб структуры; TSV; трехмерная интеграция.

An innovative approach has been proposed for transferring alignment marks on thin wafers. The approach is implemented by means of temporary bonding technology. "Viewing windows" are made in the carrier wafer to scan the alignment marks on the build wafer. An array of TSV structures is made using double-sided lithography and plasma-chemical etching.
**Keywords:** temporary bonding; deflection of the structure; TSV; 3D integration

В данной работе решена проблема переноса знаков совмещения с лицевой на обратную сторону для утоненной Si-пластины толщиной 140 мкм и диаметром 150 мм. Реализация решения осуществляется за счет применения технологии временного бондинга. Используется Si-пластина-носитель с большими сквозными полостями, выполняющими роль смотровых окон. К сожалению, использование в качестве прозрачного носителя стеклянной пластины не приводит к успеху, т. к. возникают механические напряжения из-за разницы ТКЛР утоненной пластины и пластины-носителя. Механические напряжения приводят к значительному изгибу микросборки.

Описание экспериментальных структур представлено ниже (рис. 1).

Измерения прогиба проводились на оптическом профилометре. Прогиб микросборки Si-Si не превышает 10 мкм до и после утонения. Таким образом, посредством наблюдения меток через «смотровые окна» на пластине-носителе обеспечивается возможность проводить совмещение рисунка на лицевой стороне утоненной рабочей пластины с формируемым рисунком на обратной стороне утоненной рабочей пластины (рис. 2).

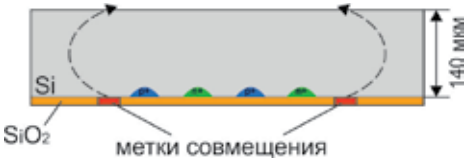
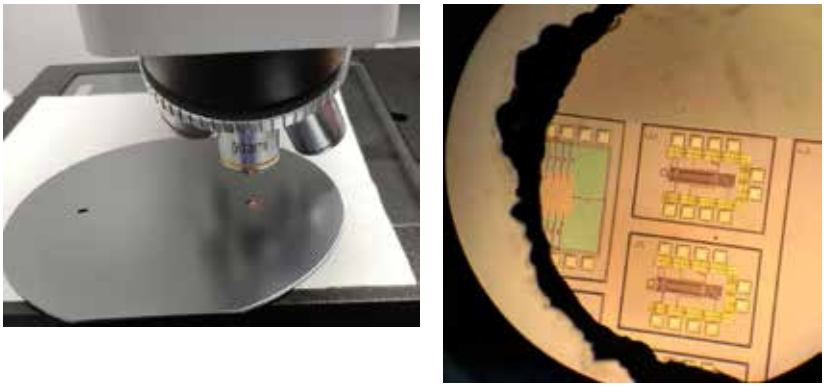



**Рис. 1.** Схематичный вид утоненной пластины



*а* *б*

**Рис. 2.** Микросборка со «смотровыми окнами»: *а* — общий вид; *б* — область знаков

***Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 418ГР/57264 от 26.12.2019.***

The research deals with the problem of transferring alignment marks from the front to the back side for a thinned Si wafer (140 microns thick and 150 mm in diameter). The solution is implemented through the use of temporary bonding technology. A Si carrier wafer is used with large through cavities that act as viewing windows. Unfortunately, the use of a glass plate as a transparent carrier does not lead to success, as mechanical stresses arise due to the difference in TCLE of the thinned wafer and the carrier wafer. Mechanical stresses lead to significant bending of the microassembly.

A description of the experimental structures is presented below (fig. 1).

The deflection has been measured using an optical profilometer. The deflection of the Si-Si microassembly does not exceed 10 microns before and after thinning. Thus, by observing the marks through the “viewing windows” on the carrier plate, it is possible to align the pattern on the front side of the thinned working plate with the pattern being formed on the reverse side of the thinned working plate (fig. 2).

***This work was supported by the Fund for the Promotion of Innovations under contract № 418GR/57264 dated 26.12. 2019.***

УДК 621.3.049.76 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.522.524

# Ресурсные испытания холодных катодов, созданных на основе углеродных наностенок

## Resource Tests of cold Cathodes Created on the Basis of Carbon Nanowalls

**Бавижев З. Р.[1], Самородов В. А.[1], Бавижев М. Д.[1], Тимошенков С. П.[2], Хузин И. М.[2]**
*[1] АО «НПП «Радий»*
*г. Москва*
*mbavizhev@mail.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*Spt111@mail.ru; alfaromeo155@mail.ru*

**Bavizhev Z. R., Samorodov V. A., Bavizhev M. D., Timoshenkov S. P., Khuzin I. M.**

Работа посвящена экспериментальным исследованиям по созданию автоэмиссионных катодов на основе углеродных пленок, полученных осаждением углеродной пленки на кремниевую подложку, и их ресурсному испытанию при больших токах. Исследования могут помочь при создании микросистем источников сильноточных электронных пучков.

**Ключевые слова:** автоэмиссионные катоды; углеродные наностенки; холодные катоды; вольт-амперная характеристика эмиссионного катода; ресурсные испытания.

При производстве широкого класса электронных устройств, в том числе и устройств СВЧ электроники, очень привлекательным является использование в их конструкции полевых эмиттеров (или холодных катодов). Однако воздействие газовой среды и ионная бомбардировка сильно ухудшают параметры эмиссии таких катодов. Влияние этих факторов особенно сильно сказывается в условиях технического вакуума ($10^{-6}$–$10^{-8}$ Торр) и при высоких электрических полях. На сегодняшний день их успешное использование можно найти лишь в сверхвысоковакуумных и слаботочных системах. Поэтому очень актуальным является получение холодных катодов, способных отдавать большие токи и иметь большой ресурс работы в условиях технического вакуума.

Эксперименты проводились на автоэмиссионных катодах, полученных при осаждении углеродной пленки на кремниевую подложку размером 7×18 мм из газовой фазы, активированной разрядом постоянного тока. Газовая смесь состояла из водорода и метана [1].

Сначала катод проходил предварительную проверку на эмиссионные свойства. Для этого он испытывался в диодной схеме на зазоре 250 мкм в вакууме $10^{-6}$ Торр в импульсном режиме. Частота импульсов — 50 Гц, длительность — 100 мкс. Анодом служил люминесцентный экран. При малых токах проходила предварительная тренировка катода и снималась вольт-амперная характеристика (ВАХ). Данный катод имел достаточно однородное свечение по всей своей поверхности, низкий

порог эмиссии около 2 В/мкм и крутую ВАХ. Катод помещался в сборку с медным анодом диаметром 1 мм на зазоре 120 мкм и испытывался в вакууме уже в режиме стабилизации постоянного тока. Разгон катода происходил токовыми ступеньками с шагом 1 мА. Ток доводился до 9 мА, а затем снижался до 7,85 мА, что соответствовало плотности тока 1 А/см$^2$. В этом режиме катод отрабатывал 1 час. После этого катод проходил процедуры обезгаживания и отпая. Камера откачивалась до остаточного давления $1{,}2 \cdot 10^{-7}$ Торр. Далее она нагревалась до 280 °С и выдерживалась при этой температуре 6 часов. Когда камера остывала до 130 °С, у нее перекрывался высокотемпературный откачной вентиль. Затем магниторазрядный насос (МРН) доводил вакуум в остывшей камере до $10^{-8}$ Торр. В режиме стабилизации устанавливался постоянный ток с плотностью 1 А/см$^2$. Далее катод проходил ресурсные испытания в режиме стабилизации постоянного тока с плотностью 1 А/см$^2$ не менее 500 часов (на рис. 1).

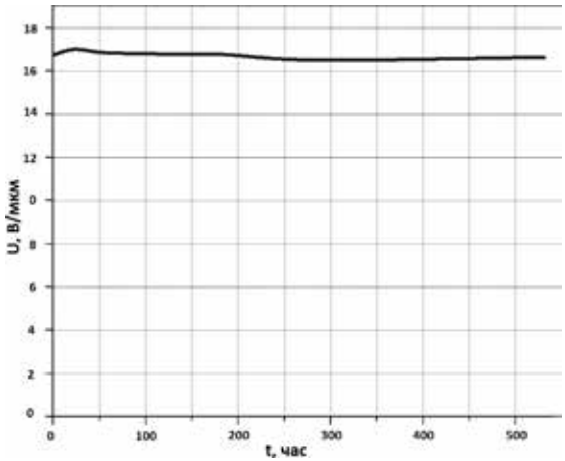



**Рис. 1.** Ресурсные испытания при токе 1 А/см$^2$

В процессе ресурсных испытаний катод два раза выключался на короткое время для снятия ВАХ, после чего вновь выводился на ток 1 А/см$^2$ с продолжением испытаний. На рис. 2 показаны ВАХ после 113 и 456 часов работы катода. В процессе испытаний вольт-амперная характеристика практически не изменилась.

В результате выполнения работы созданы автоэмиссионные катоды, проведены ресурсные испытания с наработкой более 500 часов и плотностью тока 1 А/см$^2$. На протяжении всех испытаний ВАХ катода практически не изменились, что говорит об очень низкой деградации катода.

Данные результаты могут помочь при создании эмиссионных микросистем, источников сильноточных электронных пучков, аналогичных [2], различных электронных устройств [3], а также устройств в области СВЧ электроники.

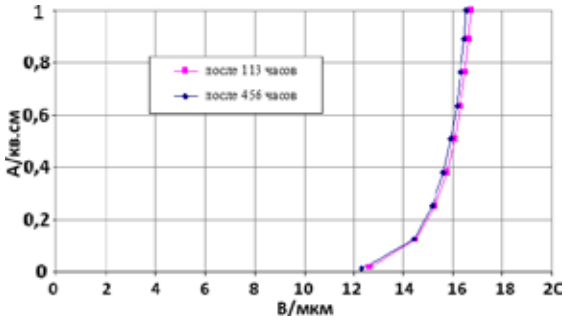



**Рис.** 2. ВАХ в процессе ресурсных испытаний

***Литература***

1. Blyablin A.A., Kandidov A.V., Timofeev M.A., Seleznev B.V., Pilevsky A.A., Rakhimov A.T., Suetin N.V., Samorodov V.A. Cold-emission film-type cathode and method for producing the same. United States Patent 6,577,045 B1. June 10, 2003.
2. Дзбановский Н.Н., Минаков П.В., Пилевский А.А., Рахимов А.Т. и др. Сильноточная электронная пушка на основе автоэмиссионного катода и алмазной сетки // ЖТФ, 2005. — Т. 75. — № 10. — С. 111.
3. Blyablin A.A., Rakhimov A.T., Samorodov V.A., Suetin N.V., Timofeev M.A. Cold emission film cathode and flat panel display with nanocrystalline carbon film emitter. United States Patent 6,870,309 B2. Mart 22, 2005.

УДК 544.6.076 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.525.526

# Метод коррекции ошибки электрохимического гироскопа

## Electrochemical Gyroscope Error Correction Method

**Дудкин П. В.[1], Жевненко Д. А.[1,2,3], Горнев Е. С.[2,3], Криштоп Т. В., Криштоп В. Г.[1,4]**
*[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[2] ООО «Сейсмотроника»*
*127204, г. Москва, Долгопрудненское ш., 3*
*[3] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[4] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*
*dudkin@phystech.edu*

**Dudkin P. V.[1], Zhevnenko D. A.[1,2,3], Gornev Ye. S.[2,3], Krishtop T. V., Krishtop V. G.[1,4]**
*[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[2] Seismotronics LLC*
*3 Dolgoprudnenskoye Hwy., Dolgoprudny, 141700*
*[3] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[4] Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia*

В данной работе мы предлагаем еще один метод коррекции ошибок электрохимического гироскопа с помощью дополнительного электрохимического генератора, имеющего отклик на механический сигнал на удвоенной частоте. Метод коррекции ошибок основан на сравнении спектра сигнала с ЭХП и удвоенного спектра дополнительного генератора.

**Ключевые слова:** сенсоры; электрохимические микросистемы; планарный электрохимический преобразователь; нелинейные эффекты; передаточная функция; диффузионный перенос.

Развитие современных измерительных инерциальных систем выдвигает новые требования к качеству измерений, и прогресс в области микроэлектронных МЭМС-акселерометров и гироскопов все еще не может полностью удовлетворить эти все возрастающие требования. Высокоточные волоконно-оптические и лазерные гироскопы и пьезоакселерометры на два-три порядка превосходят МЭМС по стоимости. В то же время разработка планарных электрохимических микросистем может привести к появлению новых возможностей для производства инерциальных датчиков.

В настоящее время разработаны и используются для медленных высокоточных измерений угловые акселерометры на основе электрохимических преобразователей

(ЭХП) [1–4]. Основное техническое преимущество электрохимических систем — высокая точность на низких частотах ($10^{-3}$–10 Гц). Это свойство может быть полезным в системах, где основная ошибка измерения накапливается из-за низкочастотных медленных эволюций, — подводных и космических аппаратах. Основным источником дрейфа нуля в этом случае являются слабые низкочастотные смещения, которые лежат за пределами возможностей инерциальной системы на основе МЭМС.

В то же время с помощью ЭХП-гироскопов эти слабые сигналы вполне измеримы благодаря значительно более низкому уровню собственных шумов. Таким образом, добавление высокоточных низкочастотных электрохимических гироскопов в системы на основе МЭМС позволит значительно уменьшить дрейф нуля и накопление ошибки имеющихся инерциальных систем. Совместное использование низкочастотных МГД ЭХП угловых и линейных акселерометров и высокочастотных МЭМС позволит обеспечить высокое качество измерения в широком частотном диапазоне.

В данной работе мы предлагаем еще один метод коррекции ошибок электрохимического гироскопа с помощью дополнительного электрохимического генератора, имеющего отклик на механический сигнал на удвоенной частоте. Мы разработали устройство, выдающее отклик на механический сигнал на удвоенной частоте относительно исходного сигнала, и метод коррекции ошибок, основанный на сравнении спектра сигнала с ЭХП и удвоенного спектра дополнительного генератора.

Результаты данной работы могут быть использованы в гироскопии и навигации для улучшения точности инерциальных систем.

***Литература***

1. Krishtop V. G. Experimental Modeling of the Temperature Dependence of the Transfer Function of Rotational Motion Sensors Based on Electrochemical Transducers // Russian Journal of Electrochemistry, 2014. Vol. 50. № 4. P. 350–354. URL: https://doi.org/10.1134/S1023193514040053.
2. Zaitsev D. L., Agafonov V. M., Egorov E. V., Antonov A. N., Krishtop V. G. Precession Azimuth Sensing with Low-Noise Molecular Electronics Angular Sensors // Journal of Sensors (Hindawi) Vol. 2016. Article ID 6148019. URL: http://dx.doi.org/10.1155/2016/6148019.
3. Zaitsev D., Antonov A. and Krishtop V. Angular MET sensor for precise azimuth determination // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241H (December 30, 2016); doi:10.1117/12.2267073. URL: http://dx.doi.org/10.1117/12.2267073.
4. Сафонов М. В., Криштоп В. Г. Молекулярно-электронный датчик угловых движений. Патент на полезную модель RU 112438 U1, 10.01.2012. Заявка № 2011106908/28 от 25.02.2011.

УДК 621.3.049.76 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.527.529

# Разработка энергосберегающего комплекса с использованием микронаносистемной техники для создания цифрового двойника промышленного предприятия

## Development of an Energy-saving Complex Using Micronanosystem Equipment for Creating a Digital Copy of an Industrial Enterprise

**Чепахин В. Г.[1], Шепелев С. О.[2], Тимошенков С. П.[2], Степанов Е. В.[3], Тетерин В. А.[4]**

*[1] АО«НПО «Радиоэлектроника» им. В. И. Шимко»*
*420029, г. Казань, ул. Журналистов, 50*
*chepakhin@list.ru*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*spt111@mail.ru*
*[3] АО «АйСиЭл-КПО ВС»*
*420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, 34, корп. 1*
*[4] ООО «СервисМонтажИнтеграция»*
*420053, г. Казань, ул. Поперечно-Ноксинская, 3*

**Chepakhin V. G., Shepelev S. O., Timoshenkov S. P., Stepanov Ye. V., Teterin V. A.**

Рассмотрены проблемы, задачи и перспективы разработки и создания энергосберегающего комплекса с использованием приборов микросистемной техники. Предложен комплексный подход к созданию устройств, который позволяет снижать энергопотребление, а также является элементом индустриального Интернета вещей для построения «цифрового двойника» системы электроснабжения предприятия и системы управления мощностью.

**Ключевые слова:** компоненты микросистемной техники; цифровой двойник; энергосберегающий комплекс.

Основным трендом в настоящее время является процесс цифровизации и интеллектуализации самых различных областей жизнедеятельности. Эта тенденция также затрагивает и промышленность, начиная от внедрения систем управления производством и складом и заканчивая различными системами для оценки общей эффективности оборудования (OEE — Overall Equipment Effectiveness), постепенно встраиваемой в производственный процесс современных компаний. Внедрение таких систем — это необходимое условие для организации на промышленном предприятии цифрового производства (Индустрия 4.0), заключающегося в создании единого информационного пространства, с помощью которого все автоматизированные системы управления предприятием, а также промышленное оборудование могут оперативно и своевременно обмениваться информацией.

Для создания такой системы на предприятии необходимо внедрить систему MDC (Machine Data Collection — сбор машинных данных), которая позволяет собирать данные о работе различных производственных объектов (станки, освещение, оборудование, рабочие места основных сотрудников, сервисные службы и т. д.).

Полученные данные позволяют не только получать актуальную информацию о состоянии оборудования в конкретный момент, но и накапливать данные для последующего анализа. Необходимо создавать и использовать энергосберегающее оборудование с функцией онлайн-диспетчеризации, что может обеспечить существенное снижение потребления электроэнергии (активной мощности). Сбор информации о производстве открывает возможность использования современных технологий для оптимизации и увеличения эффективности производственных процессов при помощи работы с big data. Это не только накопление больших объемов данных о различных процессах, но и различные инструменты, подходы и методы обработки как структурированных, так и неструктурированных данных для того, чтобы их использовать в целях управления производством.

На данный момент существует большое количество различных систем для управления предприятием, состоящих из программ как для отображения данных о работе предприятия, так и для сбора и обработки данных. В зависимости от уровня цифровизации предприятия многие процессы могут контролироваться при помощи бумажных чек-листов, на первый взгляд, это быстро и дешево, однако у этого метода есть много минусов, начиная от возможности манипуляции с вводимыми данными, заканчивая затратами бумаги и ресурсов на печать, выдачу чек-листов их сбор и оцифровку.

Развитием подобного подхода служат системы сбора данных, основанные на использовании видеонаблюдения и сторонних наблюдателей. За увеличение точности учитываемых данных приходится расплачиваться затратами на оборудование и специалистов, на хранение записей и настройку сложных алгоритмов распознавания видео, на сбор информации. Распространены системы, позволяющие в автоматическом режиме собирать различные данные при помощи учета технологических операций терминалами TCD — считыванием штрих-кодов на продукции, при технологических операциях или на карточках работников. Большая степень автоматизации и точность фиксации различных показателей требуют затрат на оборудование рабочих мест, настройку системы и адаптацию технологических процессов совместной работы с такой системой.

Внедрение комплексных систем сбора информации путем доработки программного обеспечения управления станком или добавление внешних блоков для автоматического учета работы оборудования без участия операторов существенно увеличивает точность получаемых данных и затрудняет процессы фальсификации данных персоналом. Комплексные автоматизированные системы обладают возможностями автоматического оповещения персонала в момент отметки простоя (аварии) оборудования, учета выработки продукции, контроля технологических процессов и производственных карт. Внедрение подобной системы требует материальных затрат и времени, в некоторых случаях — разработки специальных блоков считывания и контроля для устаревшего или уникального оборудования. Необходимо создавать устройства, которые позволяют снижать энергопотребление, а также являются элементом индустриального Интернета вещей (IoT) для построения «цифрового двойника» системы электроснабжения предприятия и системы управления мощностью. Для правильной эффективной «встройки» в новую архитектуру электроэнергетики потребители электроэнергии смогут разработать цифровые двойники своих энергетических систем и создать механизмы обмена цифровыми данными с внешней средой, что позволит существенно экономить электроэнергию.

Технология управления параметрами сети позволит обеспечить снижение потребляемой электроэнергии, а также снизить вероятность выхода из строя дорогостоящего оборудования.

При анализе и изучении различных систем управления предприятием и сбора информации о работе оборудования, предлагаемых на рынке на данный момент, необходимо отметить большое количество иностранных компонентов в критических отраслях инфраструктуры, необходимых для функционирования как системы, так и предприятия. Тем самым, внедрение иностранных систем может увеличить эффективность работы предприятия, однако при этом создать риски, связанные с прекращением поддержки или даже отключением ряда элементов в случае введения санкций против России в целом или предприятия в частности. Минимизация рисков связанных с «отключением» систем обеспечения производства возможна лишь при внедрении систем, разработанных в России, либо при импортозамещении различных компонентов иностранных систем, обеспечивающих их бесперебойное функционирование.

Одними из наиболее важных элементов подобных систем являются элементы организации аппаратного управления оборудованием и элементы считывания данных с оборудования. При разработке этих устройств необходимо использовать отечественную элементную базу не только в периферийных системах, таких как питание или считывание сигналов и т.д. Важно при разработке устройства делать упор на применение отечественных микроконтроллеров. Это позволит не только не зависеть от возможных сбоев в поставках импортных микроконтроллеров (после пандемии ситуация с дефицитом некоторых ключевых компонентов оказала существенное влияние на сроки производства сложных электронных устройств), но и реализовать устройства с встроенной криптозащитой в соответствии с ГОСТ. На данный момент на рынке доступны различные отечественные микроконтроллеры, однако из них можно выделить контроллер RISK-V MIK32, который обладает конкурентоспособными характеристиками и имеет интегрированный блок вычисления контрольной суммы (CRC), а также ускоритель симметричной криптографии по ГОСТ Р 34.12-2015 и AES 128, что позволяет использовать его для реализации коммуникационных блоков в целях проводной передачи данных, а также различных трансиверов для организации беспроводной передачи данных, в том числе организации IoT- (Internet of Things) сетей на предприятии или в составе блоков для распределенных сенсорных MESH-сетей (ячеистая топология сети с высокой отказоустойчивостью).

Для реализации сложных систем управления и автоматизации контроля работы оборудования предлагается сделать акцент на разработку модульных устройств, использующих в своем составе отечественные контроллеры. Основной частью концепции должна быть не только криптографическая защита обмена данными между элементами системы, но и возможность собрать из модулей блок автоматизации для оптимального решения производственной задачи.

УДК 538.975 + 621.316.849 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.530.531

# Механизм коэрцитивности в тонких пленках $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$

## Coercivity Mechanism in $Ni_{0.76}Fe_{0.18}Co_{0.06}$ thin Films

**Грабов А. Б., Баранов А. А., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А.**
*ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»*
*115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а*

**Grabov A. B., Baranov A. A., Obizhayev D. Yu., Zhukova S. A.**
*FSUE "CNIIHM"*
*16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487*

Рассмотрен механизм возникновения коэрцитивности в тонких пленках мягких ферромагнетиков. Показана связь $H_c$ с параметрами гальваномагнитного транспорта в металле. В тонких пленках $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ 6-зондовым методом измерены гальваномагнитные эффекты. Описаны два типа зависимостей $H_c = f(\theta)$.
**Ключевые слова:** анизотропное магнитосопротивление; коэрцитивность; гальваномагнитный транспорт; шестизондовый метод.

Тройной сплав $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ — материал тонкопленочных анизотропных магниторезистивных (АМР) сенсоров и компонентов наномагноники. Тонкие пленки $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ находятся в однодоменном состоянии, но, тем не менее, наблюдается $0 < H_c < 1{,}5$ Э. С одной стороны, это противоречит большинству теорий гистерезиса (Стонера — Вольфарта, Джильса — Атертона, Глобуса, Прейсаха и т. п.), связывающих коэрцитивность $H_c$ с блоховскими стенками и их фиксацией (pining) на дефектах. С другой же — модель случайной анизотропии (Random Anisotropy Model-RAM [Alben & Herzer]) связывает $H_c$ с параметрами гальваномагнитного транспорта электронов.

Но в общем случае гальваномагнитный транспорт в ферромагнетиках осуществляется $2^3$ типами носителей. Ток через образец можно выразить в виде суммы проводимостей:

$$\frac{1}{\bar{\rho}_\Sigma} = \sum_{n=0}^{n=8} \frac{1}{\bar{\rho}_n + [R_n \bar{B}]}. \qquad (1)$$

Для случая $B = H_c$ и $n = 2$, удельное сопротивление слоя $\rho_\Sigma$ имеет вид

$$\rho_\Sigma(H_c) = \frac{R_e R_h H_c^2 \cos^2\alpha + H_c \cos\alpha(\rho_e R_h + \rho_h R_e) + \rho_e \rho_h}{\rho_e + \rho_h + H_c(R_e + R_c)\cos\alpha}. \qquad (2)$$

Это квадратное уравнение относительно $H_c \cos\alpha$. Приведя его к каноническому виду и заменив в решении $\rho_n = \dfrac{a}{\hbar N_n e^2 \lambda_n}$, где a — объем сферы Ферми, $N_n$ — концентрация носителей n-го типа, $\lambda_n$ — длина свободного пробега и $R_n = \dfrac{1}{N_n ec}$, получим

$$H_c = \frac{1}{\cos\alpha} \frac{a}{\hbar e^5 c^3} \cdot \frac{-N_e^2\lambda_e - N_h^2\lambda_h \pm \sqrt{N_e^2 N_h^2 \lambda_e \lambda_h + (N_e^3\lambda_e^2 + N_h^3\lambda_h^2)(N_e - N_h)}}{N_e^2 N_h^2 \lambda_e \lambda_h}. \qquad (3)$$

Величины $H_c$, $N_e$ и $N_h$ в (3) вещественные и положительные, т. е. (3) имеет решение только при условии $N_e > N_h$. Конечное значение $H_c$ наблюдается только при токопереносе двумя типами носителей.

Были выбраны 16 образцов тонких пленок $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$. 6-зондовым методом были сняты семейства ом-эрстедных характеристик при повороте подложки на угол θ от 0° до 360° с шагом 10°. Магнитное поле изменялось в диапазоне ±30 Э с шагом 0,1 Э. По ом-эрстедным характеристикам строились полярные диаграммы величин dR/R, $H_c$ и $H_к$ от угла поворота подложки θ. Образцы были разделены на две группы. В группу I вошли пластины, у которых dR/R > 3,5%. В группу II вошли пластины с dR/R < 3,5%.

Диаграммы зависимости $dR/R = f(\theta)$ всех образцов имеют гантелеобразную форму с перетяжкой в области ОТН, где dR/R падает практически до нуля. Амплитуда каждой кривой соответствует максимальной величине АМР-эффекта в пленке. Форма диаграммы зависимости $H_к = f(\theta)$ в обеих группах тоже может быть охарактеризована как гантелеобразная. Ось симметрии «перетяжки» также направлена вдоль ОТН.

В случае $H_c = f(\theta)$ форма кривых имеет гантелеобразную форму только для образцов в группе II. Причем ось симметрии «перетяжки» направлена вдоль ОЛН. В группе I гантелеобразную форму зависимости $H_c = f(\theta)$ имеет только один образец, причем он имеет наименьшее значение dR/R в I группе. Остальные образцы группы I имеют «звездчатый» вид зависимости $H_c = f(\theta)$ с сильно меньшей амплитудой, чем у гантелеобразных зависимостей.

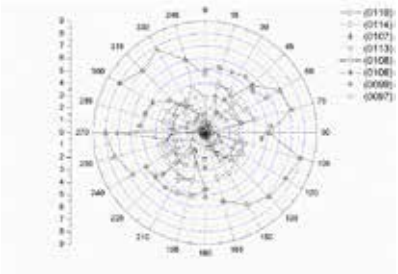


**Рис. 1.** Диаграмма $H_c = f(\theta)$ для I группы образцов (3,5% < dR/R < 5,0%)

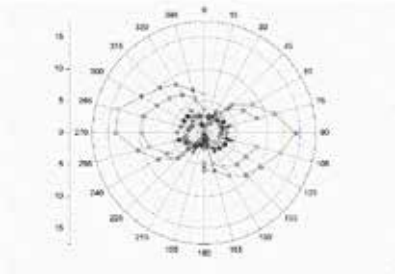


**Рис. 2.** Диаграмма $H_c = f(\theta)$ для II группы образцов (0% < dR/R < 1,5%)

Наблюдаемые зависимости объясняются тем, что $H_c$ в $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ зависит не от электронного токопереноса, как следует из RAM, а от дырочного, обеспечиваемого спариванием атомов Fe по четыре штуки. При этом в Ni и Co дырочные зоны, способные образовать структуру «трехмерной решетки», отсутствуют. Атомы Ni и Co, внедренные в объемные диагональные позиции в подрешетке Fe, как бы «разрывают» дырочные траектории, не меняя формы траекторий электронных. В случае (рис. 1) получается, что если $\lambda_e$ будет иметь порядок $10^2 a_r$, то $\lambda_h$ будет иметь порядок $a_r$. Гантелеобразная зависимость $H_c = f(\theta)$ соответствует максимальной величине дырочного токопереноса (рис. 2). В этих ячейках на двух плоскостях (100) и (010) имеется по четыре спаренных атома Fe. При таком спаривании будет $\lambda_{e=} \lambda_h$, что соответствует минимальной разности $(\lambda_e^2 - \lambda_h^2)^2$.

В ячейках, в которых не образуется ни одной плоскости с четырьмя спаренными атомами Fe, $\lambda_e$ будет иметь порядок $10^2 a_r$, тогда $\lambda_h$ будет иметь порядок $a_r$, что соответствует наибольшему значению разности $(\lambda_e^2 - \lambda_h^2)^2$, минимальному дырочному току и максимальному значению $\Delta\rho/\rho$.

УДК 539.232 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.532.533

# Методика оценки характеристик терморезистивного слоя на основе оксида ванадия

## Methods for Evaluating the Characteristics of the Thermoresistive Layer Based on Vanadium Oxide

**Ерастов Д. А., Жукова С. А., Турков В. Е., Демин С. А., Трошин Б. В., Рубцов И. А., Парышева Е. Д.**
*ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»*
*115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а*

**Yerastov D. A., Zhukova S. A., Turkov V. Ye., Demin S. A., Troshin B. V., Rubtsov I. A., Parysheva Ye. D.**
*FSUE "CNIIHM"*
*16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487*

В настоящем докладе сообщается о методике оценки характеристик тонких пленок оксида ванадия ($VO_x$), полученных на поликоровых подложках методом реактивного магнетронного распыления мишени ванадия. Пленки $VO_x$ используются в качестве терморезистивного слоя микроболометрических матриц. Измерение поверхностного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления должно осуществляться на четырехзондовой установке при температуре свыше 300 К.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление; ИК-детекторы; оксид ванадия ($VO_x$); реактивное магнетронное распыление; терморезистивный слой; микроболометрическая матрица.

Матричные микроболометрические приемники представляют собой массив фоточувствительных микроболометров мостикового типа, состоящих из термочувствительного сопротивления, подвешенного на слабо теплопроводящих несущих балках («ножках») над подложкой, на которой может быть изготовлено считывающее устройство (мультиплексор). На подложке под болометром для увеличения поглощения ИК-излучения наносится зеркало, зазор между которым и болометром составляет четверть длины волны середины рабочего диапазона. Этот вариант является наиболее оптимальным, поскольку позволяет использовать преимущества интегрального исполнения чувствительных элементов и схемы обработки сигналов на одном кремниевом кристалле, а также получить высокий коэффициент заполнения площади приемника чувствительными элементами. В качестве терморезистивного материала в неохлаждаемых микроболометрах преимущественно используются оксиды ванадия и аморфный кремний. В приемниках на основе $VO_x$ поглощение ИК-излучения происходит непосредственно в конструктивных элементах микроболометра [1–2]. В частности, в ИК-диапазоне поглощение происходит в слоях нитрида кремния и обусловлено Si–N-связями, что задает область спектральной чувствительности матрицы.

Тонкие пленки $VO_x$ толщиной 0,1–0,2 мкм при комнатной температуре имеют сопротивление, удобное для согласования микроболометров со считывающей электроникой [1–3]. Осаждение пленок оксида ванадия, состоящих только

из одной стабильной фазы, — достаточно трудоемкая задача вследствие изменения окислительно-восстановительных условий в процессе реактивного магнетронного осаждения и образования локальных областей с содержанием кристаллических структур $VO_2$, $V_2O_3$ и $V_2O_5$ [3–5]. Авторы вышеупомянутых работ предлагают повышать ТКС со стабильным получением пленок методом прогрева образцов в процессе формирования слоя $VO_x$ или после осаждения пленок путем отжига при температуре около 800 K. Однако высокие температуры (более 550 K) могут привести к деформации жертвенного слоя и мостиковых структур. В предлагаемой методике измерение поверхностного сопротивления пленок $VO_x$ в процессе осаждения в рабочей камере проводилось в режиме реального времени [6–7]. В качестве подложки использовались поликоровые образцы с жертвенным слоем и алюминиевыми контактами, а контроль сопротивления и температурного коэффициента сопротивления осуществлялся на четырехзондовой установке.

Использованные методы реактивного магнетронного распыления мишени ванадия и последующая оценка характеристик существенно облегчают задачи по формированию пленок $VO_x$ и позволяют обеспечить стабильные характеристики поверхностного сопротивления, ТКС, однородности, воспроизводимости. Разработанная методика оценки характеристик во время процесса осаждения и после может быть использована для формирования терморезистивного слоя $VO_x$ при изготовлении микроболометрических приемников.

***Литература***


1. Зеров В. Ю., Куликов Ю. В., Маляров В. Г. и др. Пленки VOx с улучшенными болометрическими характеристиками для ИК-матриц // Журнал технической физики, 2001. — Вып. 9. — Т. 27. — С. 57–63.
2. Кикалов Д. О., Малиненко В. П., Пергамент А. Л., Стефанович В. Г. Оптические свойства тонких пленок аморфных оксидов ванадия // ФТТ, 1999. — Т. 28. — № 8. — С. 1643–1649.
3. Стефанович В. Г. Фазовый переход металл-полупроводник в структурно разупорядоченной двуокиси ванадия: дис. на соис. канд. физ. мат. наук. — Петрозаводск, 1986. — 185 с.
4. Рогальский А. ИК-детекторы: пер. с английского / Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003.
5. Жукова С. А., Турков В. Е., Обижаев Д. Ю., Рискин Д. Д., Четверов Ю. С. Особенности технологии изготовления высокочувствительных неохлаждаемых микроболометрических матриц // Нано- и микросистемная техника, 2014. — № 5. — С. 41–47.
6. Ерастов Д. А., Жукова С. А., Баранов А. А., Турков В. Е., Ульянов С. А., Третьякова М. С., Москвичев В. Ю. Получение тонких пленок VOX методом реактивного магнетронного осаждения для микроболометрических приложений // XXIV научно-техническая конференция. — М.: АО «НПО «Орион», 2016. — (С54). — С. 496.
7. Ерастов Д. А., Жукова С. А., Демин С. А., Турков В. Е., Ульянов С. А., Трошин Б. В. Напыление оксида ванадия с высоким температурным коэффициентом сопротивления // Наноиндустрия, 2017. — С. 543.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.534.536

# Измерение фотоэлектрических параметров перспективных детекторов систем технического зрения

## Measuring Photoelectric Parameters of Promising Detectors of Technical Vision Systems

**Копцев Д. А., Жукова С. А., Турков В. Е.**
*ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»*
*115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а*
*koptsev.dmitry.a@gmail.com*

**Koptsev D. A., Zhukova S. A., Turkov V. Ye.**
*FSUE "CNIIHM"*
*16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487*
*koptsev.dmitry.a@gmail.com*

Предложена методика измерения фотоэлектрических параметров микроболометрических матриц. Приведена схема стенда, позволяющего реализовать данную методику.

**Ключевые слова:** МФПУ; микроболометрическая матрица; измерение; ЭШРТ; вольтовая чувствительность.

Основными характеристиками матричных фотоприемных устройств (МФПУ), определяющими их показатели качества, являются вольтовая чувствительность к потоку падающего на плоскость чувствительных элементов ИК-изображения и эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ). Совместно с размахом выходного напряжения видеовыхода схемы считывания и количеством годных бездефектных пикселей указанные выше характеристики позволяют объективно оценивать качество рассматриваемого МФПУ, сравнивать его с аналогами, а также прогнозировать достижимые характеристики приборов, разрабатываемых на основе данных МФПУ. В качестве критериев годности пикселя общепринято использовать относительное отклонение вольтовой чувствительности и ЭШРТ рассматриваемого пикселя от средних значений этих параметров для исследуемого образца МФПУ.

Как известно из работы [1], вольтовая чувствительность практически линейна от потока падающей на пиксель энергии излучения для большинства типов сенсоров. В лабораторных исследованиях в качестве источника излучения в диапазоне 8–14 мкм удобно использовать протяженные абсолютно черные тела (АЧТ), излучающая поверхность которых больше проекции матрицы чувствительных элементов. В этом случае АЧТ можно рассматривать как ламбертовский источник, неравномерность которого может быть рассчитана по формуле [2]

$$\Delta E = 1 - \cos^4\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{a}{2L}\right)\right),$$

где $a$ — диагональ МФПУ, $L$ — расстояние от диафрагмы АЧТ до МФПУ.

Поток энергии, излучаемой АЧТ, зависит от температуры АЧТ в соответствии с законом Планка, поэтому вольтовая чувствительность имеет зависимость

от температуры сцены. В качестве типового паспортного параметра МФПУ принято рассматривать вольтовую чувствительность при температуре $T_1 = 300$ K, которая может быть найдена согласно формуле

$$S_v = \frac{V_{O2} - V_{O1}}{T_2 - T_1}[\text{мВ/K}],$$

где $V_{O2}$ и $V_{O1}$ — напряжения на видеовыходе МФПУ, соответствующие рассматриваемому пикселю, при температурах проецируемой на данный пиксель сцены $T_2$ и $T_1$ соответственно.

В качестве температуры $T_2$ обычно выбирают значение от 305 до 315 K. При меньшей разнице между температурами $T_2$ и $T_1$ погрешность установки температуры АЧТ значительно увеличивает абсолютную погрешность измерения вольтовой чувствительности. Большое различие в температурах $T_2$ и $T_1$ приводит к необходимости учета нелинейности изменения потока энергии от температуры. Для снижения влияния случайной помехи допускается использовать усредненное по нескольким кадрам значение напряжения видеовыхода.

ЭШРТ может быть найдена как отношение среднеквадратичного значения (СКЗ) шума в видеовыходе к вольтовой чувствительности. При измерении СКЗ шума необходимо использовать не более 100 последовательных кадров, т.к. при большем значении существенное влияние может оказать низкочастотная составляющая *1/f* шума. Измерение СКЗ шума осуществляется при размещении ФПУ напротив АЧТ с температурой $T_1$.

Годными предлагается считать те пиксели, вольтовая чувствительность которых не более чем на 50% отличается от типовой (наиболее часто встречаемой) вольтовой чувствительности и ЭШРТ которых не более чем на 50% превосходит типовую ЭШРТ для данного образца МФПУ.

Для измерения вольтовой чувствительности и ЭШРТ разработан стенд, схема которого приведена на рис. 1.

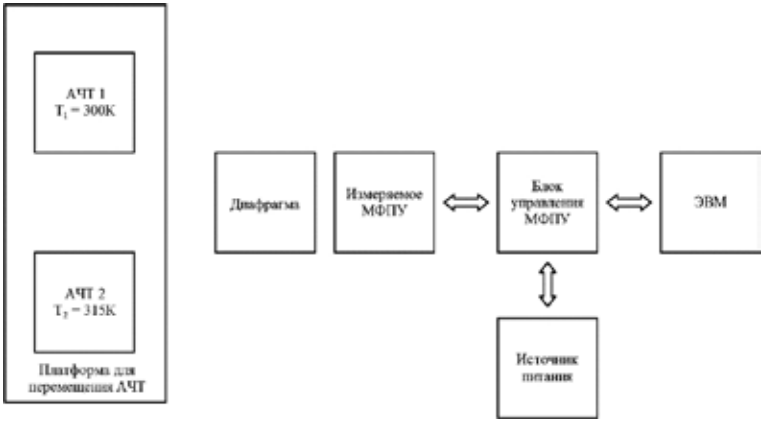



**Рис. 1.** Блок-схема стенда для измерения фотоэлектрических параметров

Разработанный стенд позволяет с высокой достоверностью измерять основные фотоэлектрические параметры МФПУ, работающих в диапазоне 8–14 мкм, что позволяет объективно сравнивать МФПУ различных конструкций и прогнозировать параметры приборов, разрабатываемых на основе данных МФПУ.

***Литература***

1. Rogers R. K., Edwards W. D., Waddle C. E. Reporting NETD: Why Measurement Techniques Matter // Proc. of SPIE Vol. 9071. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXV, 2014.
2. Полесский А. В. Методики измерения основных фотоэлектронных параметров ФПУ второго поколения (обзор) // Успехи прикладной физики, 2017. — Т. 5. — № 4. — С. 350–359.
3. Chrzanowski K. Testing Thermal Imagers, Warsaw 2010.

УДК 681.586.7 + 53.087.92 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.537.539

# Трехосевой магниторезистивный преобразователь слабого магнитного поля

## Three-axis Magnetoresistive Weak Magnetic Field Transducer

**Амеличев В. В., Костюк Д. В., Васильев Д. В., Казаков Ю. В., Жуков Д. А., Орлов Е. П., Беляков П. А.**
*НПК «Технологический центр»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1, стр. 7*
*avv@tcen.ru*

**Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Vasilyev D. V., Kazakov Y. V., Zhukov D. A., Orlov E. P., Belyakov P. A.**
*"Technological Centre" SMC*
*bld. 7, 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498*
*avv@tcen.ru*

Представлены результаты разработки трехосевого магниторезистивного преобразователя слабого магнитного поля (ТОМРП) с нечетной передаточной характеристикой. Изложены особенности конструктивного решения ТОМРП. Приведены результаты испытания ТОМРП в условиях внешних воздействующих факторов (ВВФ).
**Ключевые слова:** магнитное поле; нечетная передаточная характеристика; нелинейность; трехосевой преобразователь магнитного поля.

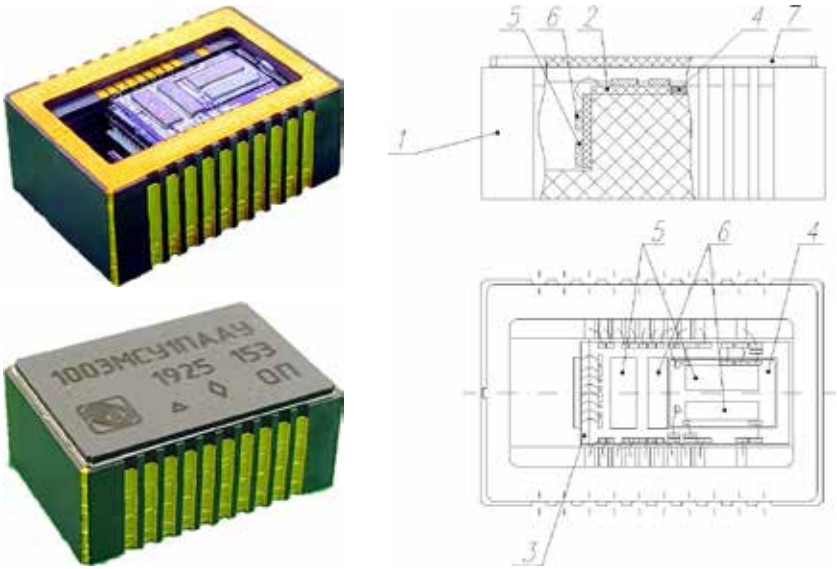
The paper considers the results of developing a three-axis magnetoresistive weak magnetic field transducer (TAMRT) with an odd transfer characteristic. The design features of the TAMRT have been outlined. The results of testing the TAMRT under the conditions of external influencing factors have been presented.
**Keywords:** magnetic field; odd transfer characteristic; nonlinearity; three-axis magnetic field transducer.

Для определения направления вектора магнитной индукции востребованы ТОМРП. В настоящее время ТОМРП могут изготавливаться как на анизотропном магниторезистивном (АМР), так и на гигантском магниторезистивном (ГМР) эффектах. Анизотропные магниторезистивные преобразователи магнитного поля (АМРПМП) с нечетной передаточной характеристикой являются наиболее распространенными из-за более доступной технологии и часто используются в составе навигационных приборов различной техники и мобильных устройств.

Разработанный в НПК «Технологический центр» конструктивно-технологический базис производства магниторезистивных микросистем позволяет реализовывать ТОМРП. На рис. 1 представлены фотоснимок и эскиз конструкции ТОМРП в металлокерамическом немагнитном корпусе (тип — МК 5223.20-А). Особенностью данной конструкции является использование в производстве двух кристаллов АМРПМП, монтированных в основание корпуса на две ортогональные плоскости. Один из кристаллов, предназначенный для преобразования Y-компоненты вектора магнитной индукции **B**, имеет размеры 5,3×3,5×0,45 мм, изготавливается по тонкопленочной технологии АМРПМП с использованием девяти фотолитографических

циклов (ФЛЦ). Другой кристалл, предназначенный для преобразования X- и Z-компонентов вектора магнитной индукции **B**, представляет собой комбинацию «два в одном», когда в едином технологическом цикле формируются кристаллы для преобразования X- и Z-компонентов **B**, а на этапе сборки они разделяются на два. Технология формирования данного кристалла совмещает технологические процессы тонкопленочной технологии АМРП и мембранных МЭМС. Количество ФЛЦ для формирования данного кристалла увеличено до 11.

В данной конструкции ТОМРП мостовые схемы каждой из осей чувствительности соединены параллельно, выводы на питание и землю общие, а выводы остальных функциональных элементов изделия индивидуальные. Над каждой мостовой схемой располагаются планарные катушки подмагничивания установки/сброса и смещения «нуля» (set/reset и offset, соответственно).




*а* *б*

**Рис. 1.** Фотоснимок (*а*) и эскиз конструкции (*б*) ТОМРП в металлокерамическом немагнитном корпусе МК 2134.16-А, где: 1 — основание корпуса; 2 — кремниевый кристалл, содержащий элементы для преобразования магнитного поля по оси чувствительности X; 3 — кремниевый кристалл, содержащий элементы для преобразования магнитного поля по оси чувствительности Z; 4 — кремниевый кристалл, содержащий элементы для преобразования магнитного поля по оси чувствительности Y; 5, 6 — концентраторы магнитного поля; 7 — крышка корпуса

Коэффициент преобразования ТОМРП составляет не менее 1,2 мВ/(В·Гс), рабочий диапазон по магнитному полю каждой оси чувствительности составляет ±2 Гс. На рис. 2 представлены типовые выходные характеристики для каждой из трех осей.

Проведенные испытания подтвердили устойчивость и прочность ТОМРП к ВВФ, а также воздействию специальных ВВФ.

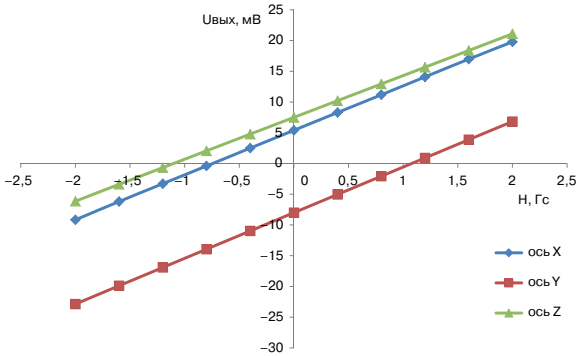



**Рис. 2.** Типовые выходные передаточные характеристики для каждой из трех осей ТОМРП

В результате выполнения опытно-конструкторской работы был создан, исследован и испытан ТОМРП. Данные результаты исследования являются очередным шагом в развитии отечественных многоосевых микросистем для навигационных приборов и устройств.

Представленные в данной работе результаты получены в том числе с применением оборудования центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

***Литература***

1. 1-, 2- и 3-осевые магнитные датчики. URL: https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aero/en-us/documents/learn/products/sensors/datasheet/HMC_1051-1052-1053_Data_Sheet.pdf?download=true (дата обращения: 03.07.20), язык английский.
2. Датчики магнитного поля от Honeywell. URL: http://embeddedsoft.ru/index.php?page=29 (дата обращения: 11.08.2020), язык русский.

УДК 612.171.1 + 681.2.083 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.540.542

# Возможности применения MEMS-датчиков для неинвазивной диагностики заболеваний

## Possibilities of Using MEMS Sensors for Non-invasive Diagnostics of Diseases

**Ачильдиев В. М.[1,2], Грузевич Ю. К.[1,3], Бедро Н. А.[1], Евсеева Ю. Н.[1], Рулев М. Е.[1,2], Коннова Н. С.[3], Басараб М. А.[3]**
*[1] ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»*
*107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, 23, стр. 2*
*glmnems@gmail.com, yukg@mail.ru*
*[2] Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1*
*maxxim98@yandex.ru*
*[3] МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*
*nkonnova@bmstu.ru, basarab@bmstu.ru*

**Achildiev V. M.[1,2], Gruzevich Yu. K.[1,3], Bedro N. A.[1], Evseeva Yu. N.[1], Rulev M. E.[1,2], Konnova N. S.[3], Basarab M. A.[3]**
*[1] "Scientific & Production Unity GEOPHIZIKA-NV" JSC*
*bld. 2, 23 Matrosskaya Tishina St., Moscow, 107076*
*glmnems@gmail.com, yukg@mail.ru*
*[2] Mytischi Branch of Bauman MSTU*
*1 1st Institutskaya St., Mytischi, 141005*
*nkonnova@bmstu.ru, basarab@bmstu.ru*
*[3] Bauman MSTU*
*bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005*
*nkonnova@bmstu.ru, basarab@bmstu.ru*

Рассмотрены возможности применения сигналов МЭМС-датчиков для неинвазивной диагностики заболеваний человека. Описаны полученные авторами результаты разработки системы с МЭМС-акселерометрами и гироскопами, ее применения, методов цифровой обработки и информационного анализа полученных сигналов.
**Ключевые слова:** электрокардиография; сейсмокардиография; гирокардиография; МЭМС-акселерометры; МЭМС-гироскопы; цифровая обработка сигналов; машинное обучение.

The report is devoted to the possibilities of using the signals of MEMS sensors for non-invasive diagnostics of human diseases. The authors describe the results of the development of a system that includes MEMS accelerometers and gyroscopes, its application, methods of digital signal processing, and information analysis of the received signals.
**Keywords:** electrocardiography; seismocardiography; gyrocardiography; MEMS-accelerometer; MEMS gyroscope; digital signal processing; machine learning.

В настоящее время ведется множество разработок аппаратного и программного обеспечения для регистрации и информационного анализа сигналов MEMS датчиков в целях оценки состояния здоровья и скрининга заболеваний.

В исследовании использовались сигналы электрокардиограммы (ЭКГ), а также сейсмокардиограммы (СКГ) и гирокардиограммы (ГКГ), зарегистрированные MEMS-датчиками на нижней границе грудины в положении лежа. Коллективом авторов из ОАО «НПО Геофизика-НВ», МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «АРК Системс» при участии профессора В. М. Успенского разработан опытный образец электросейсмогирокардиоблока [1], набрана база из нескольких сотен измерений на условно здоровых испытуемых.

Авторами предложена модификация метода информационного анализа ЭКГ для диагностики неинфекционных заболеваний внутренних органов, предложенного В. М. Успенским [2], применительно к сигналам СКГ и ГКГ. Из рассмотренных методов обработки сигналов СКГ на основе машинного обучения наилучшую эффективность показал классификатор по принципу сверточной нейросети при определении аномалий в работе сердечно-сосудистой системы [3].

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-02019.***

***Литература***

1. Ачильдиев В. М., Бедро Н. А., Успенский В. М., Грузевич Ю. К., Комарова М. Н., Рулев М. Е., Евсеева Ю. Н. Гирокардиоблок для неинвазивной диагностики заболеваний человека // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. — С. 63–183.
2. Пат. 2407431 Российская Федерация, МПК A61B 5/0452. Способ диагностики заболеваний внутренних органов / Успенский В. М.; приор. 07.07.2009; заявитель и патентообладатель Успенский В. М.; опубл. 27.12.2010, бюл. № 36.
3. Коннова Н. С., Хаперская В. Ю. Применение нейросетей и алгоритмов машинного обучения с целью диагностики сердечно-сосудистых заболеваний на основе сигналов СКГ // Биомедицинская радиоэлектроника, 2020. — Т. 23. — № 1. — С. 5–20. DOI: 10.18127/j15604136-202001-01.

Currently, many hardware and software research projects are underway for recording and processing MEMS sensor output signals for the purpose of assessing health status and screening diseases.

The study used electrocardiography (ECG) signals, as well as seismocardiography (SCG) and gyrocardiography (GCG) signals recorded by MEMS sensors on the lower border of the sternum in the supine position. A team of authors from “SPU Geofizika-NV” St.Com., BMSTU, ARK Systems LLC, with the participation of Professor V. M. Uspenskiy have designed a prototype of an ElectroSeismoGyroCardiography System. A database of several hundred measurements has been collected on conditionally healthy subjects.

The authors have modified the ECG information analysis method for the diagnosis of non-infectious diseases of internal organs, proposed by V. M. Uspensky [2], and applied it to the SCG and GCG signals. A classifier based on a convolutional neural network has shown the best efficiency among studied methods of determining anomalies in the work of the cardiovascular system based on machine learning [3].

***The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-29-02019.***

***References***

1. Achildiev V. M., Bedro N. A., Uspenskiy V. M., Gruzevich Yu. K., Komarova M. N., Rulev M. E., Evseeva Yu. N. Gyrocardiography Unit for Non-Invasive Human Diseases Diagnosis, 27th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2020. P. 63–183.
2. Uspenskij V. M. Method Of Diagnosing Diseases Of Internal Organs, RF Patent № 2407431, 1996.
3. Konnova N. S., Khaperskaya V. Yu. Primenenie neirosetei i algoritmov mashinnogo obucheniya s tsel'yu diagnostiki serdechno-sosudistykh zabolevanii na osnove signalov SKG // Biomeditsinskaya radioelektronika. 2020. V. 23. № 1. P. 5–20. DOI: 10.18127/j15604136-202001-01. (In Russian).

УДК 629.021 + 629.351.2 + 681.2.083 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.543.544

# Бесплатформенный инерциальный блок для системы активной безопасности транспортного средства

## Gimballes Inertial Block for the Vehicle Active Safety System

**Ачильдиев В. М.[1,2], Грузевич Ю. К.[1,3], Солдатенков В. А.[1], Бедро Н. А.[1], Рулев М. Е.[1,2], Журавлев Н. М.[1]**
*[1] ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»*
*107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, 23, стр. 2*
*glmnems@geo-nv.com, geo@elnet.msk.ru, job_nick@mail.ru, tormoznak@mail.ru*
*[2] Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*141005, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1*
*maxxim98@yandex.ru*
*[3] МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*
*yukg@mail.ru*

**Achil'diyev V. M.[1,2], Gruzevich Yu. K.[1,3], Soldatenkov V. A.[1], Bedro N. A.[1], Rulev M. Ye.[1,2], Zhuravlev N. M.[1]**

Доклад посвящен разработке и исследованию системы активной безопасности транспортных средств. Описан алгоритм работы антиблокировочной, противобуксовочной систем и системы курсовой устойчивости с использованием бесплатформенного инерциального блока. Представлены результаты исследований и испытаний.

**Ключевые слова:** антиблокировочная система; противобуксовочная система; система курсовой устойчивости; МЭМС-акселерометры; МЭМС-гироскопы; бесплатформенный инерциальный блок.

Системы активной безопасности предназначены для предотвращения аварийных ситуаций, что позволяет в критических ситуациях сохранять контроль за транспортным средством (ТС) [1]. Среди систем безопасности выделяют антиблокировочную систему (АБС), противобуксовочную систему (ПБС) и систему курсовой устойчивости (СКУ). В настоящее время отечественные грузовые автомобили оснащаются АБС, ПБС и СКУ фирмы WABCO, которая является лидером в производстве систем активной безопасности автомобиля. Тенденции развития современных автомобилей указывают на стремление производителей непрерывно повышать контроль за параметрами движения ТС, чтобы обеспечить максимальную степень их управляемости и устойчивости [2].

По своей функциональности АБС/ПБС/СКУ непосредственно связаны с тормозным приводом автомобиля и преследуют общую цель — предотвращение аварий и повышение безопасности. В связи с этим встала задача разработать единую систему, содержащую АБС/ПБС/СКУ, и установить бесплатформенный инерциальный блок (БИБ), включающий в себя по три МЭМС-акселерометра и гироскопа. Применение БИБ позволит существенно уменьшить погрешности измерений параметров движения и тем самым повысить точность системы, сделав ее полностью наблюдаемой.

Наличие БИБ позволяет модернизировать состав и алгоритм работы системы безопасности. Так, помимо БИБ, АБС/ПБС/СКУ содержат датчики угловой скорости и линейных ускорений колес, датчик угла поворота рулевого колеса, электронный блок управления, состоящий их микропроцессора, узла контроля и блока ключей, модуляторы давления воздуха, отвечающие за разблокировку колес при получении соответствующего сигнала, дифференциальный клапан на ведущей и передней осях для регулировки подачи топлива в двигатель при торможении и блок управления двигателем.

В режиме АБС/ПБС непрерывно определяются значения коэффициентов сцепления $\Phi_x$ от коэффициентов скольжения каждого колеса $S$. Затем определяются экстремумы функции $\Phi_x(S)$. Для расчета параметров используется информация с БИБ и датчика угловой скорости и линейных ускорений колес. Далее формируется управляющий сигнал, который уменьшает/увеличивает давление через модулятор в тормозном приводе. При этом управляющий сигнал должен обеспечить максимальную близость значения коэффициента сцепления к экстремальному.

В режиме СКУ вычисляется курсовой угол продольной оси ТС $\theta$ путем интегрирования угловой скорости автомобиля, измеряемой БИБ. Далее это значение сравнивается со значением угла поворота рулевого колеса $\Theta$. В случае если $\theta \neq \Theta$, происходит притормаживание колеса и возникает стабилизирующий момент.

В режиме предотвращения опрокидывания непрерывно рассчитывается угол наклона поперечной оси ТС $\psi$ относительно плоскости местного горизонта. Это значение сравнивается с критическим углом отрыва колес от опорной поверхности $\psi_o$. При условии, что $\psi \geq 0{,}5\psi_o$, происходит притормаживание колес правого или левого борта автомобиля. После устранения угрозы опрокидывания система приходит в исходное положение контроля движения.

Авторы считают, что в настоящей работе новыми являются следующие положения:

- обосновано создание единой системы контроля динамики автомобиля, состоящей из АБС, ПБС и СКУ, на основе микромеханического БИБ;
- предложен алгоритм работы АБС/ПБС/СКУ, основой которого являются параметры, идентифицируемые БИБ, датчиками угловой скорости и линейных ускорений колес, а также датчиком угла поворота рулевого колеса;
- результаты испытаний БИБ в составе транспортного средства показали, что использование параметра $\Phi_x$ позволяет поддерживать максимальное сцепление автомобиля с поверхностью и не допускать блокировки/пробуксовки колес.

***Литература***

1. Жилейкин М. М. Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе нечеткой логики. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 238 с.
2. Ахметшин А. М. Самообучающая антиблокировочная тормозная система колесных машин. — М.: МГИУ, 2002. — 140 с.

УДК 621.317.321 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.545.546

# Емкостной биосенсор для измерения электрических потенциалов

## Capacitive Biosensor for Measuring Electrical Potentials

**Горлов Н. С.[1], к. т. н., Вертянов Д. В.[1], д. т. н., Тимошенков С. П.[1]**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*gorlov.nikolai.s@mail.ru*

**Gorlov N. S.[1], Ph.D, Vertyanov D. V.[1], Sc.D, Timoshenkov S. P.[1]**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*gorlov.nikolai.s@mail.ru*

Разработан емкостной биосенсор измерения электрических потенциалов для применения в компактных системах контроля сердечной деятельности. Описан новый технологический процесс формирования переходных микроотверстий в полиимидной микроструктуре для изготовления МПП-биосенсора по 6-му лассу точности.
**Ключевые слова:** емкостной биосенсор; измерение электрических потенциалов; электрокардиограмма; полиимидные пленки; химическое травление полиимида.

A capacitive biosensor for measuring electric potentials has been developed for use in compact cardiac monitoring systems. The paper presents a new technological process of formation of microvia in polyimide microstructure for manufacturing a multilayer PCB of the biosensor according to the 6th accuracy class.
**Ключевые слова:** capacitive biosensor; electrical potentials measurement; electrocardiogram; polyimide films; chemical etching of polyimide.

На сегодняшний день огромное количество людей страдают от сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), а возраст людей, подверженных им, становится все меньше. Своевременное выявление и лечение ССЗ могут значительно увеличить среднюю продолжительность жизни людей. В настоящее время набирают популярность компактные персональные системы контроля сердечной активности (Холтер-мониторинг, фитнес-браслеты, смарт-часы, «умная» одежда и др.). С их помощью не требуется личное посещение медицинских учреждений, результаты ЭКГ лечащий врач может отслеживать дистанционно. Для таких систем необходимы универсальные компактные биосенсоры, выполняющие роль электродов.

Для решения актуальной задачи миниатюризации разработаны конструкция емкостного биосенсора с существенным уменьшением габаритов и технологический процесс формирования переходных микроотверстий диаметром менее 75 мкм в полиимидной структуре для изготовления многослойной печатной платы (МПП) биосенсора по 6-му классу точности.

Работа устройства основана на емкостной связи чувствительного элемента биосенсора с поверхностью кожи, так как электрод сенсора защищен слоем диэлектрического материала. Обработка сигнала осуществляется несколькими

каскадами высокоимпедансного операционного усилителя. В дифференциальном режиме два биосенсора можно использовать для восстановления сигналов электрокардиограммы, используя потенциалы с поверхности кожи.

Особенности конструкции биосенсора:

- фольгированный безадгезивный полиимид DuPont Pyralux (толщина диэлектрика — 25,4 мкм, толщина фольги — 9 мкм) в качестве материала МПП;
- четырехканальный высокоимпедансный усилитель в микрокорпусе WLCSP;
- МПП по 6-му классу точности с переходными микроотверстиями диаметром менее 75 мкм;
- кремний толщиной 0,5 мм с $SiO_2$ (0,7 мкм) на внешней стороне в качестве чувствительного элемента биосенсора;
- габариты: 6×6×1 мм (ближайший аналог PS25251 — 10×10×2 мм).

Для возможности практической реализации данной конструкции было проведено исследование формирования переходных микроотверстий диаметром менее 75 мкм в полиимидном диэлектрике на основе полиамидокислот химическим травлением. Для минимизации подтравов и стабилизации скорости травления в щелочном растворе на основе KOH необходимо проводить процесс химического травления полиимида в диапазоне температур 110–120 °C. С учетом полученных результатов разработан новый технологический процесс изготовления прецизионных многослойных коммутационных плат на основе полиимидных материалов для биосенсора.

***Литература***

1. Горлов Н. С., Вертянов Д. В. Бесконтактные датчики для измерения электрических потенциалов и перспективы их применения // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: Сборник трудов научно-практической конференции, Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус, 3–8 февраля 2020 года. — Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус: Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 2020. — С. 42–50.
2. Бекмачев А. Датчики Epic от Plessey Semiconductors — прорыв в сенсорных технологиях // Компоненты и технологии, 2013. — № 1. — С. 21–24.
3. Connor S. EPIC: A New Epoch in Electric Potential Sensing, Sensors mag., Sep-1, 2011, URL: https://www.fierceelectronics.com/embedded/epic-a-new-epoch-electric-potential-sensing (дата обращения: 27.07.2021).

УДК 621.3.049.779 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.547.548

# Разработка и исследование микромеханического датчика удара

## Development and Research of a Micromechanical Shock Sensor

**Кочурина Е. С.[1,2], к. т. н., Виноградов А. И.[1,2], Боев Л. Р.[1,2], Зарянкин Н. М.[1,2], к. т. н., Анчутин С. А.[1,2], Тимошенков А. С.[1,2], д. т. н.**
*[1] ООО «Лаборатория микроприборов»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*ekochurina@mp-lab.ru, plavec@list.ru, leo.boev@mail.ru, step@mail.ru, n.zaryankin@mail.ru, at@mp-lab.ru*

**Kochurina E. S.[1,2], Ph.D, Vinogradov A. I.[1,2], Boev L. R.[1,2], Zaryankin N. M.[1,2], Ph.D, Anchutin S. A.[1,2], Timoshenkov A. S.[1,2], Sc.D**
*[1] Laboratory of Microdevices Ltd.*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*ekochurina@mp-lab.ru, plavec@list.ru, leo.boev@mail.ru, step@mail.ru, n.zaryankin@mail.ru, at@mp-lab.ru*

Приведено описание разработанной конструкции микромеханического датчика удара, изложены результаты моделирования: модального анализа, анализа при воздействии удара. Приведены результаты испытаний, показывающие соответствие изготовленных датчиков модели.
**Ключевые слова:** микромеханический датчик удара; кремний на изоляторе; глубокое травление; метод конечных элементов; МЭМС; результаты экспериментальных исследований.

The paper presents the developed design of the micromechanical shock sensor and results of modeling: modal analysis, analysis under the impact. Besides, it gives the test results showing the correspondence of the manufactured sensors to the model.
**Keywords:** micromechanical shock sensor; silicon on insulator; deep etching; finite element method; MEMS; experimental research results.

Микромеханический датчик удара представляет собой нормально разомкнутый инерционный ключ, обеспечивающий замыкание контактов при воздействии удара вдоль оси чувствительности. Датчик удара состоит из инерционной массы, которая при помощи упругих соединений (торсионов) подвешена к основанию. При достижении номинального значения ударного воздействия инерционная масса приводит к замыканию металлизированных контактов подвижных и неподвижных областей, напыленных на крышке с внутренней стороны.

Проведенные расчеты конструкции микромеханического датчика удара показали работоспособность конструкции. В ходе анализа были определены собственные частоты разработанной конструкции, «рабочая» частота составляет 2128 Гц.

По результатам статического расчета определена величина смещения инерциальной массы 11,2 мкм при воздействии 200 g.

Микромеханический датчик удара изготовлен из КНИ-структуры. Кристалл датчика присоединяется к стеклянному основанию методом анодного сращивания. Приведен график сравнения зависимости ТКЛР кремния и стекла Borofloat 33 и выбрана температура 300 °C [1]. С помощью Bosch-процесса проводилось глубокое травление кремния.

Разработанный микромеханический датчик удара серии КМГ имеет следующие параметры:

- перегрузка для обеспечения замыкания ключа — 200 g;
- внешние габаритные размеры датчика — не более 3,2×3,2×1,4 мм.

Проведенный анализ результатов испытаний показал, что из 30 изготовленных датчиков удара:

- 9 штук (30 %) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 194 до 206 g (1–3 % от расчетного уровня 200 g);
- 12 штук (40 %) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 186 до 214 g (3–7 % от расчетного уровня 200 g);
- 9 штук (30 %) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 180 до 220 g (7–10 % от расчетного уровня 200 g).

Разработан датчик удара оригинальной конструкции. Приведены результаты моделирования датчика удара. Микромеханический датчик удара изготовлен из КНИ-структуры, при травлении кремния применялся Bosch-процесс [2]. Приведены параметры Bosch-процесса. Проведенные испытания показали, что изготовленные датчики удара имеют уровень срабатывания 200 g с допуском 10 %.

***Литература***

1. Скупов А. Анодная и непосредственная сварка пластин для микроэлектроники // Вектор высоких технологий, 2015. — № 5 (18). — 36 с.
2. Тимошенков С. П., Калугин В. В., Анчутин С. А., Зарянкин Н. М., Кочурина Е. С. Особенности конструкции и технологии изготовления чувствительного элемента микроакселерометра // Наноиндустрия. Спецвыпуск (89), 2019. — 480 с.

УДК 537.622.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.549.551

# Магнитные свойства тонких поликристаллических пленок пермаллоя для анизотропных магниторезистивных структур

## Magnetic Properties of Thin Polycrystalline Permalloy Films for Anisotropic Magnetoresistive Structures

**Дюжев Н. А.[1,2], к. ф.-м. н., Демин Г. Д.[1,2], к. ф.-м. н., Медведев Б. К.[2], д. т. н., Андрюшин Р. Н.[1,2], Носкова Д. Д.[2]**
*[1] ООО «Ай-Арт»*
*141206, г. Пушкино, ул. Л. Толстого, 20а*
*gddemin@edu.miet.ru*
*[2] ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база», Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

**Djuzhev N. A.[1,2], Ph.D, Demin G. D.[1,2], Ph.D, Medvedev B. K.[2], Sc.D, Andrushin R. N.[1,2], Noskova D. D.[2]**
*[1] "I-Art" LLC*
*20a L. Tolstoy St., Pushkino, 141206, Russia*
*gddemin@edu.miet.ru*
*[2] "MEMSEC" R&D Center*
*National Research University of Electronic Technology (MIET)*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527*

В зависимости от размера кристаллического зерна были измерены магнитные параметры (коэрцитивность, коэффициент AMR и поле магнитной анизотропии) наноразмерных пленок пермаллоя ($Ni_{80}Fe_{20}$), предназначенных для магниторезистивных элементов AMR-сенсоров. Полученные результаты могут быть применимы для оптимизации МЭМС-технологии анизотропных магниторезистивных структур в целях достижения максимальной выходной чувствительности AMR-сенсора к внешнему магнитному полю.
**Ключевые слова:** МЭМС-технология; AMR; размер зерна; сенсор магнитного поля; магниторезистивная структура.

Depending on the crystal grain size, the magnetic parameters (coercivity, AMR coefficient and magnetic anisotropy field) of nano-thin permalloy (Ni80Fe20) films for magnetoresistive elements of AMR sensors have been measured. The results obtained can be applied to optimize the MEMS technology of anisotropic magnetoresistive structures in order to achieve the maximum output sensitivity of the AMR sensor to the external magnetic field.
**Keywords:** MEMS technology; AMR; grain size; magnetic field sensor; magnetoresistive structure.

Анизотропные магниторезистивные (AMR) сенсоры активно используются во многих отраслях науки и техники (автомобильная электроника, геомагнитная навигация, биомедицина), что обусловлено их хорошей чувствительностью к магнитному полю, высокой надежностью, тепловой стабильностью, устойчивостью к жестким условиям окружающей среды (радиационным воздействиям, высокой

температуре) и низкой себестоимостью. При изготовлении чувствительных элементов AMR-сенсоров важную роль играют магнитные характеристики тонких ферромагнитных пленок в составе магниторезистивных структур в наномасштабе, что, в свою очередь, зависит от их внутреннего кристаллического строения, регулируемого параметрами технологического процесса [1]. В работе исследована экспериментальная зависимость ключевых магнитных свойств (коэрцитивности, коэффициента AMR и поля магнитной анизотропии) 30-нм пленки пермаллоя ($Ni_{80}Fe_{20}$) от размера зерна, управляемого температурой подложки в процессе магнетронного напыления. Показано, что коэффициент AMR, как и поле магнитной анизотропии, с ростом зерна имеют тенденцию выхода на постоянные значения 2,25% и около 5 Э соответственно. При этом зависимость коэрцитивности пленки пермаллоя от размера зерна имеет минимум в области 8 нм и резко увеличивается при меньшей толщине, что коррелирует с результатами предыдущих исследований [2]. Полученные нами результаты важны для разработки магнитных наноструктур для нового поколения высокочувствительных сенсоров на эффекте AMR [3].

***Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (контракт №АААА-А21-121011590123-2) с использованием оборудования центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.***

***Литература***

1. Djuzhev N., Iurov A., Mazurkin N., Chinenkov M., Trifonov A. and Pushkina M. Effects of average grain size on the magnetic properties of permalloy films // EPJ Web Conf., 2018. V. 185. P. 01003.
2. Akhter M.A., Mapps D.J. and Ma Tan Y.Q. Thickness and grain-size dependence of the coercivity in permalloy thin films // J. Appl. Phys., 1997. V. 81. № 8. P. 4122.
3. Pan Y.-D., Yu L.-R., Wang L., Chen T., Wei X.-Y., Zhu R.-G., Li J.-W., Feng C. and Yu G.-H. Construction of high-performance magnetic sensor based on anisotropic magnetoresistance Ta/MgO/NiFe/MgO/Ta film // Rare Metals, 2021. V. 40. № 8. P. 2026–2032.

Anisotropic magnetoresistive (AMR) sensors are actively used in many fields of science and technology (automotive electronics, geomagnetic navigation, biomedicine), due to their good sensitivity to the magnetic field, high reliability, thermal stability, resistance to harsh environmental conditions (radiation exposure, high temperature) and low cost. An important role in the fabrication of sensitive elements of AMR sensors is played by the magnetic characteristics of thin ferromagnetic films in the composition of magnetoresistive structures at the nanoscale, which, in turn, depends on their internal crystal structure controlled by the parameters of the technological process [1]. In this work, we have experimentally analyzed the dependence of the key magnetic properties (coercivity, AMR coefficient, and magnetic anisotropy field) of a 30 nm permalloy ($Ni_{80}Fe_{20}$) thin film on its grain size controlled by the substrate temperature during magnetron sputtering. It has been shown that both the AMR coefficient and the magnetic anisotropy field tend to reach a constant level of 2,25% and 5 Oe, respectively, with an increase in the grain size. In turn, the dependence of the permalloy film coercivity on the grain size has a minimum in the region of about 8 nm and sharply increases at a smaller thickness, which correlates with the results of previous studies [2].

The results obtained are important for the development of magnetic nanostructures for a new generation of highly sensitive magnetoresistive sensors based on the AMR effect [3].

***This work was performed with the financial support of the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology (FASIE) (contract № AAAA-A21-121011590123-2) using the equipment of MIET Core Facilities Center "MEMSEC".***

***References***

1. Djuzhev N., Iurov A., Mazurkin N., Chinenkov M., Trifonov A. and Pushkina M. Effects of average grain size on the magnetic properties of permalloy films // EPJ Web Conf., 2018. V. 185. P. 01003.
2. Akhter M.A., Mapps D.J. and Ma Tan Y.Q. Thickness and grain-size dependence of the coercivity in permalloy thin films // J. Appl. Phys., 1997. V. 81. № 8. P. 4122.
3. Pan Y.-D., Yu L.-R., Wang L., Chen T., Wei X.-Y., Zhu R.-G., Li J.-W., Feng C. and Yu G.-H. Construction of high-performance magnetic sensor based on anisotropic magnetoresistance Ta/MgO/NiFe/MgO/Ta film // Rare Metals, 2021. V. 40. № 8. P. 2026–2032.

УДК 621.389 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.552.553

# Разработка планарной МЭМС-технологии автоэмиссионных металлических наноструктур в качестве элементной базы вакуумной наноэлектроники

## Developing Planar MEMS Technology of Field-emission Metal Nanostructures as an Element Base for Vacuum Nanoelectronics

**Грязнева Т. А., Демин Г. Д., к. ф.-м. н., Евсиков И. Д., Дюжев Н. А., к. ф.-м. н., Махиборода М. А., к. ф.-м. н.**
*ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база», Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*
*evsikov.ilija@yandex.ru*

**Gryazneva T. A., Demin G. D., Ph.D, Evsikov I. D., Djuzhev N. A., Ph.D, Makhiboroda M. A., Ph.D**
*"MEMSEC" R&D Center*
*National Research University of Electronic Technology (MIET)*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527*
*evsikov.ilija@yandex.ru*

Устройства вакуумной электроники зарекомендовали себя во многих технических отраслях. Для дальнейшего развития отрасли необходимо совершенствование методов изготовления автоэмиссионных (АЭ) структур. В работе представлена технология создания АЭ диодных и транзисторных структур на основе молибдена (Mo).
**Ключевые слова:** автоэлектронная эмиссия; автоэмиссионный диод; автоэмиссионный транзистор; вакуумная наноэлектроника.

Vacuum electronics devices have been approved in many technical areas. For further development of the industry, it is necessary to improve the methods of fabricating field-emission (FE) structures. The paper presents a technology for creating FE diode and transistor structures based on molybdenum.
**Keywords:** field electron emission; field-emission diode; field-emission transistor; vacuum nanoelectronics.

Вакуумная наноэлектроника — одно из приоритетных направлений современной науки. Интегральные схемы на основе автоэмиссионных наноразмерных структур могут стать основой для электронных приборов во многих областях техники, в частности для космической отрасли, поскольку полупроводниковые приборы в этом случае непригодны для долговременной стабильной работы при высоких температурах и соответствующей дозе космического излучения. За последние несколько лет произошел стремительный скачок в области разработок автоэмиссионных структур с наноразмерным вакуумным каналом на основе различных материалов [1, 2]. В данной работе представлена технология создания автоэмиссионных металлических диодных и транзисторных структур на основе Mo. На предварительно окисленные кремниевые пластины методом магнетронного напыления (PVD) нанесены слои молибдена (активный слой) и алюминия (маскирующий слой). После проведена операция электронной литографии с последующим плазмохимическим травлением Al и Mo для формирования АЭ-структур.

Основными преимуществами использования Mo в автоэмиссионных структурах являются высокая температура плавления, химическая стойкость и схожие с кремнием свойства с точки зрения плазмохимического травления. Экспериментальные вольтамперные характеристики были получены с использованием анализатора полупроводниковых приборов Agilent Keysight B1500A. Полученные зависимости подтверждают автоэмиссионный характер электронного транспорта в изготовленных АЭ-структурах.

***Данная работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» (МИЭТ) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2020-216, 0719-2020-0017, мнемокод FSMR-2020-0017).***

***Литература***

1. Nirantar S., Ahmed T., Ren G., Gutruf P., Xu C., Bhaskaran M., Walia S., Sriram S. Metal-Air Transistors: Semiconductor-Free Field-Emission Air-Channel Nanoelectronics // Nano Lett., 2018. V. 18. № 12. P. 7478–7484.
2. Ji X., Yutong S., Yongjiao S., Wenxin Y., Qilong W. and Xiaobing Z. Study on electrical properties and structure optimization of side-gate nanoscale vacuum channel transistor // Journal of Physics D, 2020. V. 53. P. 135301.

Vacuum nanoelectronics is one of the priority areas of modern science. Integrated circuits based on field-emission nanoscale structures can become the basis for electronic devices in many fields of technology, in particular, for the space industry, since semiconductor devices in this case are not suitable for long-term stable operation at high temperatures and the corresponding dose of cosmic radiation. Over the past few years, there has been a rapid leap forward in the development of field emission structures with a nanoscale vacuum channel based on various materials [1, 2]. This paper presents a technology for creating field-emission metal diode and transistor structures based on Mo. On oxidized silicon wafers, layers of molybdenum (active layer) and aluminum (masking layer) were deposited by physical vapor deposition method. After that, the operation of electron lithography was performed, followed by plasma-chemical etching of Al and Mo for the formation of FE structures. The main advantage of using Mo in field-emission structures is its high melting point, chemical resistance, and properties similar to silicon in terms of plasma-chemical etching. Experimental current-voltage characteristics were obtained using an Agilent Keysight B1500A semiconductor analyzer. The character of the obtained dependences have confirmed the field-emission character of electron transport in the fabricated FE structures.

***This work was performed on the equipment of R&D center «MEMSEC» (MIET) with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 075-03-2020-216, 0719-2020-0017, FSMR-2020-0017).***

***References***

1. Nirantar S., Ahmed T., Ren G., Gutruf P., Xu C., Bhaskaran M., Walia S., Sriram S. Metal-Air Transistors: Semiconductor-Free Field-Emission Air-Channel Nanoelectronics // Nano Lett., 2018. V. 18. № 12. P. 7478–7484.
2. Ji X., Yutong S., Yongjiao S., Wenxin Y., Qilong W. and Xiaobing Z. Study on electrical properties and structure optimization of side-gate nanoscale vacuum channel transistor // Journal of Physics D, 2020. V. 53. P. 135301.

УДК 681.586.6 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.554.556

# Мембранный МЭМС-датчик давления на тепловом принципе действия для измерения субатмосферного диапазона давлений

## Membrane MEMS-based Thermal Pressure Sensor for Measuring the Sub-atmospheric Pressure Range

**Поздняков М. М.[2], Евсиков И. Д.[1,2], Демин Г. Д.[2], к. ф.-м. н., Орешкин Г. И.[2], к. ф.-м. н., Дюжев Н. А.[2], к. ф.-м. н., Машевич П. Р.[2], к. т. н.**
*[1] ООО «Фотис»*
*248000, г. Калуга, пер. Воскресенский, дом 29, стр. 2*
*pozdnjakov.m@ckp-miet.ru*
*[2] ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база»*
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

**Pozdnyakov M. M.[2], Evsikov I. D.[1,2], Demin G. D.[2], Ph.D, Oreshkin G. I.[2], Ph.D, Dyuzhev N. A.[2], Ph.D, Mashevich P. R.[2], Ph.D**
*[1] FOTIS LLC*
*bld. 2, 29 Voskresensky Lane, Kaluga, 248000*
*pozdnjakov.m@ckp-miet.ru*
*[2] "MEMSEC" R&D Center*
*National Research University of Electronic Technology (MIET)*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527*

Предложена оригинальная концепция теплового датчика давления и проведен численный анализ его рабочих характеристик. Показано, что оптимальная конструкция датчика обеспечивает чувствительность до 4,4 мК/Па в широком диапазоне давлений (от 0,01 до 100 кПа).
**Ключевые слова:** МЭМС; датчик давления; субатмосферный диапазон; термоэлектрический эффект; тонкопленочная мембрана.

An original concept of a thermal pressure sensor has been proposed and a numerical analysis of its performance has been carried out. It has been shown that the optimal sensor design provides a sensitivity of up to 4.4 mK/Pa in a wide pressure range (from 0.01 to 100 kPa).
**Keywords:** MEMS; pressure sensor; sub-atmospheric range; thermoelectric effect; thin-film membrane.

Тонкопленочные МЭМС- (микроэлектромеханические системы) датчики давления обладают высокой чувствительностью, низкой себестоимостью, малым энергопотреблением при относительно малых размерах, что позволяет использовать их в самых разных отраслях науки и техники.

В настоящее время существует множество датчиков давления, основными из которых являются емкостные, электромагнитные, пьезоэлектрические, оптические и резонансные. Несмотря на то что каждый из датчиков имеет свои преимущества, существует также ряд недостатков (таких как узкий диапазон давлений, термическая и механическая нестабильность чувствительности и т. д.), что ограничивает спектр их областей применения [1–5]. В связи с этим важно разработать

конструкцию датчика давления, основанную на новых физических принципах, которая устраняет недостатки существующих сенсорных устройств. В данной работе предлагается новая концепция датчика давления, основанного на тепловом принципе детектирования, заключающегося в изменении температуры термочувствительных элементов из-за теплопереноса в газовой среде в процессе микромеханической деформации тонкопленочной композитной мембраны под действием избыточного давления. Заявленная концепция предполагает устойчивость к внешним условиям при высокой чувствительности в широком диапазоне давлений. Проведен численный анализ деформации мембраны и чувствительности датчика для различных типов газов (Kr, Xe, Ar) в диапазоне давлений от 0,01 до 100 кПа. Показано, что максимальная чувствительность достигается в случае выбора Xe (~4,4 мК/Па) в качестве рабочего газа, что связано с его теплопроводностью. Полученные результаты могут быть использованы при разработке чувствительных устройств для аэрокосмической техники.

***Работа выполнена в рамках реализации программы ЛИЦ «Доверенные сенсорные системы» при финансовой поддержке Минкомсвязи России и АО «РВК» (договор № 009/20 от 10.04.2020, идентификатор 0000000007119P190002).***

***Литература***

1. Jatlaoui M. M. et al. Working principle description of the wireless passive EM transduction pressure sensor // Eur. Phys. J. Appl. Phys., 2011. Vol. 56. № 1. P. 13702.
2. Wang J. et al. A Micromachined Silicon Resonant Pressure Sensor. Springer Singapore, 2017. P. 1–34.
3. Samridhi et al. Stress and frequency analysis of silicon diaphragm of MEMS based piezoresistive pressure sensor // Int. J. Mod. Phys. B., 2019. Vol. 33. № 07. P. 1950040.
4. Wang X. et al. Diaphragm design guidelines and an optical pressure sensor based on MEMS technique // Microelectronics Journal, 2006. Vol. 37. № 1. P. 50–56.
5. Parthasarathy E., Malarvizhi S. Modeling analysis and fabrication of MEMS capacitive differential pressure sensor for altimeter application // Journal of the Chinese Institute of Engineers. Vol. 41. № 3. P. 206–215.

Thin-film MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) pressure sensors have high sensitivity, low cost, low power consumption at a relatively small size, which allows them to be used in various branches of science and technology.

Currently, there are many pressure sensors, the main of which are: capacitive, electromagnetic, piezoelectric, optical and resonant. Despite the fact that each of the sensors has its own advantages, there are also a number of disadvantages (such as a narrow pressure range, thermal and mechanical instability of sensitivity, etc.), which limits the range of their applications [1–5]. In this regard, it is important to develop a pressure sensor design based on new physical principles, which eliminates the disadvantages of existing sensor devices. In this paper, we have proposed a new concept of a pressure sensor based on the thermal principle of detection, which consists in changing the temperature of thermosensitive elements due to heat transfer in a gaseous medium during micromechanical deformation of a thin-film composite membrane under the action of excess pressure. The stated concept assumes resistance to external conditions at high sensitivity in a wide range of pressures. A numerical analysis of the membrane deformation and sensor sensitivity for various types of gases (Kr,

Xe, Ar) in the pressure range from 0.01 to 100 kPa has been carried out. It has been shown that the maximum sensitivity is achieved when Xe (~4.4 mK/Pa) is selected as the working gas, which is associated with its thermal conductivity. The results obtained can be used in the development of sensitive devices for aerospace engineering.

***The work was supported by Minsvyaz RF and RVC JSC (Grant LRC «Trusted Sensor Systems» № 009/20 from 10.04.2020, unique identifier 0000000007119P190002).***

***References***

1. Jatlaoui M. M. et al. Working principle description of the wireless passive EM transduction pressure sensor // Eur. Phys. J. Appl. Phys., 2011. Vol. 56. № 1. P. 13702.
2. Wang J. et al. A Micromachined Silicon Resonant Pressure Sensor // Springer Singapore, 2017. P. 1–34.
3. Samridhi et al. Stress and frequency analysis of silicon diaphragm of MEMS based piezoresistive pressure sensor // Int. J. Mod. Phys. B., 2019. Vol. 33. № 07. P. 1950040.
4. Wang X. et al. Diaphragm design guidelines and an optical pressure sensor based on MEMS technique // Microelectronics Journal, 2006. Vol. 37. № 1. P. 50–56.
5. Parthasarathy E., Malarvizhi S. Modeling analysis and fabrication of MEMS capacitive differential pressure sensor for altimeter application // Journal of the Chinese Institute of Engineers. Vol. 41. № 3. P. 206–215.

УДК 681.586.78 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.557.559

# Расчет чувствительности тонкопленочных магниторезистивных сенсоров угла поворота для роботизированной умной перчатки

## Calculating the Sensitivity of Thin-film Magnetoresistive Rotation Angle Sensors for a Robotic Smart Glove

**Глаголев П. Ю.[1,2], Демин Г. Д.[1,2], к. ф.-м. н., Чиненков М. Ю.[2], к. ф.-м. н., Дюжев Н. А.[2], к. ф.-м. н.**
*[1] ООО «Интех Прогресс»*
*107045, г. Москва, Селиверстов пер., 10, стр. 2*
*skirdovf@mail.ru*
*[2] ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база», Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

**Glagolev P. Yu.[1,2], Demin G. D.[1,2], Ph.D, Chinenkov M. Yu.[2], Ph.D, Djuzhev N. A.[2], Ph.D**
*[1] Intec Progress*
*bld 2, 10 Seliverstov Lane, Moscow, 107045*
*skirdovf@mail.ru*
*[2] "MEMSEC" R&D Center*
*National Research University of Electronic Technology (MIET)*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527*

С применением микромагнитного моделирования проведены численные расчеты чувствительности анизотропных магниторезистивных сенсоров для различных типов топологий двухмостовой схемы чувствительного элемента. Также проведен анализ распределения магнитного поля вблизи месторасположения сенсоров на перчатке. Рассчитан линейный отклик выходного сигнала к углу поворота магнитного поля и предложены возможные способы улучшения параметров магниторезистивных структур применительно к детектированию диапазона углов до 0,5°.
**Ключевые слова:** реабилитационная перчатка; МЭМС-технология; магниторезистивный сенсор; анизотропный магниторезистивный эффект; чувствительный элемент.

Using micromagnetic simulation, numerical calculations of the sensitivity of anisotropic magnetoresistive sensors have been carried out for various types of topologies of a two-bridge circuit of a sensitive element. We have also analyzed the distribution of the magnetic field near the location of the sensors on the glove. The linear response of the sensor output signal to the angle of rotation of the magnetic field has been calculated, and possible ways to improve the parameters of magnetoresistive structures have been proposed for detecting the range of angles up to 0.5°.
**Keywords:** rehabilitation glove; MEMC technology; magnetoresistive sensor; anisotropic magnetoresistive effect; sensing element.

Одним из важных этапов нейрореабилитации людей, перенесших инсульт, является восстановление основных двигательных функций и повышение тонуса мышц фаланг паретичной руки (хват, удержание предметов, координация и т.д.). Для выполнения указанной задачи в настоящее время большую популярность приобрели роботизированные умные перчатки с системой детектирования на базе высокочувствительных сенсоров угла поворота. Существует несколько типов сенсоров, используемых в коммерческих прототипах перчаток, — датчики на основе гибких элементов [1], акселерометры [2], датчики на основе эффекта Холла [3], датчики в виде элементов растяжения [4]. Для достижения оптимального соотношения точность / надежность / быстродействие необходимо использовать гибридные устройства с комбинацией различных типов сенсоров, однако их стоимость возрастает на порядок, что приводит к удорожанию конечного продукта. С подобной задачей способны справиться датчики на основе магниторезистивного эффекта, которые обладают повышенной чувствительностью вплоть до нескольких пТл [5], высоким быстродействием, охватывающим диапазон частот от сотен кГц до нескольких ГГц [6], и хорошей надежностью. Применение кремниевой МЭМС- технологии отечественной микроэлектроники для создания магниторезистивных сенсоров серьезно удешевляет их стоимость за счет групповой обработки пластин. В данной работе проводится анализ возможных способов повышения чувствительности магниторезистивных сенсоров, обладающих линейным откликом к углу поворота магнитного поля, посредством рассмотрения новых типов материалов и топологии двухмостовой схемы тонкопленочных магниторезистивных элементов.

***Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (контракт №АААА-А20-120111290020-5) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.***

***Литература***

1. Saggio G., Riillo F., Sbernini L. and Quitadamo L. R. Resistive flex sensors: a survey // Smart Materials and Structures, 2016. V. 25. P. 013001.
2. Rashid A. and Hasan O. Wearable technologies for hand joints monitoring for rehabilitation: a survey // Microelectronics Journal, 2019. V. 88. P. 173–183.
3. Ramsden E. Hall-effect sensors: theory and applications / 2nd ed. Amsterdam; Boston: Elsevier/Newnes, 2006. P. 250.
4. Shen Z., Yi J., Li X., Mark L. H. P., Hu Y. and Wang Z. A soft stretchable bending sensor and data glove applications // Robot. Biomim., 2016. V. 3. № 22. P. 1–8.
5. Egelhoff W. F., Pong P. W. T., Unguris J., McMichael R. D., Nowak E. R., Edelstein A. S., Burnette J. E. and Fisher G. A. Critical challenges for picoTesla magnetic-tunnel-junction sensors // Sensors and Actuators A: Physical, 2009. V. 155. № 2. P. 217–225.
6. Jury J. C., Klaassen K. B., van Peppen J. C. L. and Wang S. X. Measurement and analysis of noise sources in giant magnetoresistive sensors up to 6 GHz // IEEE Trans. Magn., 2002. V. 38. № 5. P. 3545–3555.

One of the important stages in the neurorehabilitation of people who have suffered a stroke is the restoration of basic motor functions and an increase in the tone of the muscles of the phalanges of the paretic arm (grip, holding objects, coordination, etc.). To accomplish

this task, robotic smart gloves with a detection system based on highly sensitive angle sensors have become very popular. There are several types of such sensors used in commercial prototypes of gloves — sensors based on flexible elements [1], accelerometers [2], sensors based on the Hall effect [3], sensors using tensile elements [4]. To achieve the optimal ratio — accuracy / reliability / speed, it is necessary to use hybrid devices with a combination of various types of sensors, however, their cost, unlike one type of sensor, increases by an order of magnitude, which, in turn, leads to an increase in the cost of the final product. Sensors based on the magnetoresistive effect, which have increased sensitivity up to several pT [5], high speed, covering the frequency range from hundred kHz to several GHz [6], and good reliability, can cope with such a task. The use of silicon MEMS technology of domestic microelectronics for the creation of magnetoresistive sensors seriously reduces their cost due to the group wafer processing. Here we have analyzed the possible ways to increase the sensitivity of magnetoresistive sensors with a linear response to the angle of rotation of magnetic field by considering new types of materials and the topology of a two-bridge circuit of thin-film magnetoresistive elements.

***This work was performed with the financial support of the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology (FASIE) (contract № AAAA-A20-120111290020-5) using the equipment of MIET Core Facilities Center «MEMSEC».***

***References***

1. Saggio G., Riillo F., Sbernini L. and Quitadamo L. R. Resistive flex sensors: a survey // Smart Materials and Structures, 2016. V. 25. P. 013001.
2. Rashid A. and Hasan O. Wearable technologies for hand joints monitoring for rehabilitation: a survey // Microelectronics Journal, 2019. V. 88. P. 173–183.
3. Ramsden E. Hall-effect sensors: theory and applications / 2nd ed. Amsterdam; Boston: Elsevier/Newnes, 2006. P. 250.
4. Shen Z., Yi J., Li X., Mark L. H. P., Hu Y. and Wang Z. A soft stretchable bending sensor and data glove applications // Robot. Biomim., 2016. V. 3. № 22. P. 1–8.
5. Egelhoff W. F., Pong P. W. T., Unguris J., McMichael R. D., Nowak E. R., Edelstein A. S., Burnette J. E. and Fisher G. A. Critical challenges for picoTesla magnetic-tunnel-junction sensors // Sensors and Actuators A: Physical, 2009. V. 155. № 2. P. 217–225.
6. Jury J. C., Klaassen K. B., van Peppen J. C. L. and Wang S. X. Measurement and analysis of noise sources in giant magnetoresistive sensors up to 6 GHz // IEEE Trans. Magn., 2002. V. 38. № 5. P. 3545–3555.

УДК 629.78 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.560.562

# Компонент магнитной системы ориентации и стабилизации многоцелевой платформы «Синергия» блочно-модульного типа

## The Magnetic Orientation and Stabilization System Component of Block-modular Multipurpose “Synergy” Platform

**Малыгин Д. В.[1], Чабан Д. С.[1], Яковлев О. Я.[1]**
*[1] ООО «Астрономикон»*
*192286, г. Санкт-Петербург, Альпийский пер., 29, оф. 202*
*info@astronomikon.ru*

**Malygin D. V.[1], Chaban D. S.[1], Yakovlev O. Ya.[1]**
*[1] Astronomikon LLC*
*of. 202, 29 Alpiyskiy alley, St. Petersburg, 192286, Russia*
*info@astronomikon.ru*

В работе представлена технология построения и архитектура электромагнитного устройства системы ориентации и стабилизации в виде печатной платы для многоцелевой платформы «Синергия» блочно-модульного типа.
**Ключевые слова:** сверхмалый космический аппарат; наноспутник; пикоспутник; платформа «Синергия»; cubesat; система ориентации и стабилизации; электромагнитное устройство.

The paper considers a technology of design and architecture of the magnetic orientation and stabilization system component of multi-purpose block-modular “Synergy” platform for assembling nanosatellites.
**Keywords:** small spacecraft; nanosatellite; pikosatellite; “Synergy” platform; cubesat; orientation and stabilization system; electromagnetic device.

Управление угловым движением космических аппаратов (КА) формата *CubeSat* [1] осуществляется в основном двигателями-маховиками или электромагнитным устройством (ЭМУ). На начальном этапе орбитального полета КА *CubeSat* движется с большой угловой скоростью (может достигать десятков градусов [2]). Для выполнения целевой задачи (например проведения съемки поверхности Земли) необходимо гашение этой начальной угловой скорости системой ориентации и стабилизации с помощью ЭМУ; при этом возможно применение и в других режимах ориентации КА.

Основным элементом ЭМУ является магнитная токовая катушка, которая обычно выполняется в виде намотанной на вытянутый каркас (длиной до 10 см, диаметром 1–2 см) с магнитным сердечником или без него. Другим вариантом исполнения является катушка, намотанная на квадратный каркас со стороной размером до 10 см. С помощью таких катушек достигается достаточный управляющий момент для гашения начальных угловых скоростей КА *CubeSat* в течение нескольких часов.

Третьим, наименее популярным вариантом исполнения катушек ЭМУ является катушка в печатной плате (ПП). Для этого в проводящих слоях ПП вытравливаются дорожки в виде спирали, каждый из слоев может независимо от других подключаться к работе. Хотя таким образом достигается наименьший магнитный

момент [3] по сравнению с первыми двумя вариантами, к преимуществам можно отнести меньшие массу и габариты ЭМУ и упрощение технологии производства.

В настоящее время в лаборатории «Астрономикон» в качестве исполнительного органа системы ориентации и стабилизации спутниковой платформы «Синергия» [4] сверхмалого класса (массой до 10 кг) разрабатывается ЭМУ с катушкой в ПП, которая размещается в вырезе стенки каркаса. Целью работы является расчет геометрических параметров такой катушки.

Рассматриваются три варианта формы намотки: трапеция, окружность, прямоугольник. Габариты катушки определяются формой и размером выреза: трапеция с основаниями 74 и 20 мм, высотой 33 мм и толщиной 4 мм. В ПП катушки необходим вырез площадью не менее 1 см$^2$, размером не менее 7 мм для размещения электронных компонентов ЭМУ.

Для каждой из форм намотки были определены геометрические параметры, соответствующие указанным требованиям при максимизации их площади, представленные в табл. 1.

**Табл. 1.** Геометрические параметры областей для намотки катушек разных форм: *a*, *b* — основания трапеции и стороны прямоугольника, *d* — высота трапеции, $R_0$ — радиус окружности; *W* — ширина области для намотки; $S_w$ — площадь области для намотки

| Форма намотки | *a* | *b* | *d* | $R_0$ | $W_{max}$ | $N_w$ | $S_w$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | мм | | | | | Витков | мм$^2$ |
| Трапеция | 74 | 25,86 | 30 | – | 11,5 | 76 | 1354 |
| Окружность | – | | | 15 | 9,36 | 62 | 607 |
| Прямоугольник | 33,49 | 26,19 | – | | 9,59 | 63 | 777 |

Для приводящего слоя ПП толщиной 18 мкм были определены максимальные и минимальные значения суммарной площади и длины всех витков, а также сопротивления, приведенные в табл. 2. Для этого использовалась разработанная математическая модель, параметрами которой являются: ширина области для намотки, ширина витков, зазор между витками, отступы между крайними витками и краем ПП (принимались 0,1 мм), количество витков. Количество проводящих слоев определяется в зависимости от требуемого магнитного момента катушки и технологических возможностей.

**Табл. 2.** Максимальные и минимальные значения суммарной площади S и длины L в одном проводящем слое для разных форм витков (*min* (*L*) и *min* (*R*) имеют одинаковые значения, т. к. минимальное значение отношения удельного сопротивления меди к поперечному сечению min ($\gamma/\sigma$) ≈ 1))

| | Трапеция | Окружность | Прямоугольник |
|---|---|---|---|
| *S*, см$^2$ | 15; 546 | 6; 218 | 8; 275 |
| *L*, м | **0,17**; **9,04** | **0,08**; **3,99** | **0,12**; **5,17** |
| *R*, Ом | **0,17**; **120,48** | **0,08**; **53,17** | **0,12**; **68,89** |

***Литература***

1. CubeSat Design Specification. Rev. 13.
2. Белоконов И. В., Иванов Д. С., Овчинников М. Ю., Пеньков В. И. Система демпфирования углового движения наноспутника SamSat-QB50 // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2015. — № 059. — 28 с.
3. Ali H., Mughal M., Islam Q., Praks J. и L. Reyneri. Analysis and Design of Integrated Magnetorquer Coils for Attitude Control of Nanosatellites // European Cubesat Symposium, 2020.
4. Малыгин Д. В. Многоцелевая платформа «Синергия» блочно-модульного типа для сборки наноспутников // Известия высших учебных заведений. — Приборостроение, 2018. — Т. 61 — № 8.

УДК 62-408 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.563.564

# Проект малогабаритного широкодиапазонного теплового вакуумметра, работающего на основе сравнения измерительного MEMS-датчика сопротивления с компенсационными MEMS-датчиками

## A Project of a Small-sized Wide-band Thermal Vacuum Meter Based on the Comparison of the Measuring MEMS Resistance Sensor with the Compensation MEMS Sensors

**Скворцов В. Э.[1], Махиборода М. А.[2]**
*[1] ООО «Максима»*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Skvortsov V. E., Makhiboroda M. A.**

Предложена конструкция теплового вакуумметра на MEMS-датчиках сопротивления, содержащая измерительный и компенсационные датчики, находящиеся под граничными значениями диапазона измерения давления.
**Ключевые слова:** вакуумметр; давление; эталон; кремниевая мембрана.

Тепловые вакуумметры, или иначе вакуумметры Пирани, известны более ста лет. Их работа основывается на принципе зависимости теплопроводности газа от его давления. Однако в связи с тем что чувствительность, а значит, и точность измерения теплового вакуумметра зависит от величины давления газа, обычно не удается расширить диапазон измерения теплового датчика давления более чем $10^{-2}$–10 Торр. За пределами этого диапазона тепловой датчик если и может использоваться, то исключительно как индикатор, а не измеритель давления, требующий периодической калибровки.

Наш проект основан на идее создания теплового датчика давления газа, для расширения диапазона измерений давления газа в котором используется принцип сравнения трех одинаковых датчиков, представляющих тонкопленочные платиновые сопротивления, нанесенные на тонкую кремниевую мембрану, один из которых является эталоном высокого давления и заполнен пробным газом до давления выше высшего предела диапазона измерения. Второй тепловой датчик является эталоном низкого давления и находится в вакууме под давлением ниже нижнего предела диапазона измерения. А третий датчик связан с системой, где надо измерять вакуум, он находится под измеряемым давлением газа. Технология MEMS позволяет создавать датчики сопротивления с очень высокой точностью совпадения параметров и хорошей тепловой связью, что дополнительно снижает погрешность измерения. Тепловые датчики соединяются последовательно, и измерения падения напряжения на каждом из них происходят одновременно при помощи сигма-дельта-АЦП с высокой разрядностью, что снижает влияние на результаты измерения электрических помех. Малые размеры MEMS-термодатчиков позволяют обеспечивать их рабочий режим при много меньшей, чем в макротермодатчиках, электрической (и, следовательно, тепловой) мощности, что даст возможность обеспечить дополнительную стабильность температуры внешнего корпуса датчиков.

Дополнительно расширить диапазон измерения возможно, используя в каждой измерительной камере два MEMS-термодатчика различного размера, при этом датчик большего размера использовать при малых давлениях, а датчик меньшего размера — при больших давлениях.

В рамках исследования возможности создания описанного вакуумметра был изготовлен макет теплового вакуумметра с тремя макродатчиками в виде вольфрамовой нити толщиной 50 мкм, помещенной в стеклянную колбу. Три стеклянных колбы были залиты теплопроводящим герметиком в единый блок. Измерения показали, что даже подобная более примитивная, чем планируемая к созданию, система обеспечивает стабильные показания в диапазоне давлений $5 \cdot 10^{-3}$ — 40 Торр.

В настоящее время ведется разработка конструкции MEMS-термодатчика сопротивления и технологии его сборки, имеющая цель создать датчик давления, стабильно работающий в диапазоне $10^{-4}$–700 Торр.

УДК 681.121.83 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.565.566

# Исследования тепловых МЭМС-сенсоров расхода газа: конструкция, расположение в потоке газа и формирование сигнала

## The Gas Flow Thermal MEMS-sensors Study: Design, Location in the Gas Flow and Signal Generation

**Дюжев Н. А.[1], Рябов В. Т.[2], Машевич П. Р.[1], Сретенский В. В.[1], Чиненков М. Ю.[1,3]**
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*chinenkov@inbox.ru*
*[2] МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*
*[3] ООО «Микрофотоника»*
*248000, г. Калуга, ул. Первомайская, 37*

**Djuzhev N. A.[1], Ryabov V. T.[2], Mashevich P. R.[1], Sretenskiy V. V.[1], Chinenkov M. Y.[1,3]**
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*chinenkov@inbox.ru*
*[2] Bauman MSTU*
*bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005*
*[3] MIKROFOTONIKA LLC*
*37 Pervomayskaya St., Kaluga, 248000, Russia*

В работе приведены результаты исследований вариантов конструкции и способов формирования сигнала тепловых МЭМС-сенсоров для датчиков массового расхода газа. Исследовано влияние расположения сенсора в потоке газа на выходной сигнал. Предложена схема обработки сигнала МЭМС-сенсора, совмещающая калориметрический и термоанемометрический методы измерения.
**Ключевые слова:** тепловой МЭМС-сенсор; чувствительный элемент; тепловой расходомер; тонкопленочная диэлектрическая мембрана; массовый расход газа; терморезистор.

The paper presents the results of studies of design options and methods for generating the signal of thermal MEMS sensors. The influence of the sensor location in the gas flow on the output signal has been investigated. A scheme for processing the signal of a MEMS sensor combining calorimetric and thermoanemometric measurement methods has been proposed.
**Keywords:** thermal MEMS-sensor; sensing element; thermal flow meter; thin-film dielectric membrane; mass flow of gas; thermoresistor.

Использование технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволяет создавать миниатюрные чувствительные элементы (сенсоры) массового расхода газа на кремниевых кристаллах. Для расширения точности и диапазона измеряемых скоростей потока были исследованы два варианта конструкции

МЭМС-преобразователя. В первом на мембране из чередующихся слоев оксида и нитрида кремния толщиной около 0,6 мкм сформирован нагреватель и два терморезистора. Во втором варианте на мембране сформировано четыре терморезистора, расположенных попарно в двух секциях — входной и выходной по потоку газа. Для обоих вариантов установлено, что использование терморезисторов одновременно для формирования «теплового облака» и измерения температуры на его фронте и спаде по потоку позволяет упростить схему обработки сигнала сенсора. Предложена схема обработки сигнала МЭМС-сенсора, совмещающая калориметрический и термоанемометрический методы измерения и позволяющая проводить их при ламинарном и турбулентном потоках газа. Было найдено, что при расположении сенсора на крыле в центре потока в основном канале датчика наибольшая чувствительность достигается при угле наклона поверхности крыла (и сенсора) в 20° относительно оси потока. Для обеспечения высокой точности датчика важно не допускать изменения характера потока, обдувающего мембрану сенсора. Для этого можно использовать известное решение — байпасный канал, параллельный основному потоку, с ламинатором, установленным между входом и выходом канала. Основное назначение ламинатора — обеспечивать равномерно возрастающий с расходом перепад давлений на концах байпасного канала. Выход байпасного канала следует дросселировать так, чтобы характер течения потока через него не изменялся во всем диапазоне измерения датчика. Испытания МЭМС-сенсора в корпусе датчика AWM720P1, применяемого в аппаратах ИВЛ, показали, что на основе данного сенсора может быть разработан аналог этого датчика.

The microelectromechanical systems (MEMS) technologies make it possible to create miniature sensing elements (sensors) of the mass flow of gas on silicon crystals. For improvement of the accuracy and range of measured gas flow rates two variants of the MEMS converter design have been investigated. In the first model a heater and two thermoresistors are formed on a membrane of alternating layers of silicon oxide and nitride with a thickness of about 0.6 microns. In the second model four thermistors are formed on the membrane, located in pairs in two sections: the input and output along the gas flow. For both models it has been established that using thermistors simultaneously to form a “heat cloud” and measure the temperature at its front and downflow allows simplifying the sensor signal processing scheme. A scheme for processing the MEMS sensor signal has been proposed. This scheme combines calorimetric and thermoanemometric measurement methods and allows them to be carried out with laminar and turbulent gas flows. It has been found that when the sensor is located on the wing in the center of the flow in the main channel of the sensor device the greatest sensitivity is achieved when the angle of inclination of the wing surface (and the sensor) is 20° relative to the flow axis. To ensure high accuracy of the sensor, it is important not to allow changes in the flow type through the sensor membrane. It is possible to use a well-known solution: a bypass channel parallel to the main flow with a laminator installed between the input and output of the channel. The main purpose of the laminator is to provide a pressure drop that increases evenly with the flow rate at the ends of the bypass channel. The output of the bypass channel should be controlled so that the flow type through it does not change over the entire measurement range of the sensor. Investigation of the MEMS-sensor in the AWM720P1 sensor housing used in artificial lung ventilation device has shown that an analog of this sensor can be developed on the basis of this MEMS-sensor.

УДК 531.781.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.567.569

# Исследование механических свойств тонкопленочных мембран, используемых в МЭМС-приборах

## Investigating Mechanical Properties of Thin-film Membranes Used in MEMS Devices

**Глаголев П. Ю.[2], Гусев Е. Э.[1,2], к. т. н., Махиборода М. А.[1,2], к. ф.-м. н., Дюжев Н. А.[2], к. ф.-м. н.**
*[1] ООО «Сенсор-Микрон»*
*119602, г. Москва, ул. Академика Анохина, 4, корп. 3*
*m.makhiboroda@gmail.com*
*[2] ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база», Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

**Glagolev P. Yu.[2], Gusev E. E.[1,2], Ph.D, Makhiboroda M. A.[1,2], Ph.D, Djuzhev N. A.[2], Ph.D**
*[1] "Sensor-Mikron" LLC*
*4/3 Akademika Anokhina St., Moscow, 119602, Russia*
*m.makhiboroda@gmail.com*
*[2] "MEMSEC" R&D Center*
*National Research University of Electronic Technology (MIET)*
*6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527*

Произведен численный и аналитический расчет тонких мембран разного компонентного состава и различной формы. Расчеты апробированы с экспериментальными исследованиями. Рассчитано критическое давление и напряжение для всех видов и составов мембран.
**Ключевые слова:** тонкие мембраны; напряжение фон Мезиса; напряжение разрыва; модуль Вейбулла; МЭМС.

An analytical calculation of thin membranes of different composition and shape has been carried out. The calculations have been tested with experimental studies. The critical pressure and stress have been calculated for all types and compositions of membranes.
**Keywords:** thin membranes; von Mesis stress; rupture stress; Weibull modulus; MEMS.

Произведено численное моделирование методом конечных элементов с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Построена зависимость максимального прогиба и напряжений фон Мезиса от величины избыточного давления. Исследованы мембраны различной формы (круглые, квадратные, прямоугольные) и различного компонентного состава (Al, Si, $Si_3N_4$, $SiO_2$, $SiO_2/Si_3N_4$). Численные расчеты показали хорошую сходимость с аналитическими расчетами, произведенными по формулам [1, 2].

Результаты численных расчетов были апробированы с экспериментальными зависимостями максимального прогиба мембран от избыточного давления. Экспериментальные данные получены с помощью стенда, в состав которого входят форвакуумный насос для создания избыточного давления и оптический профилометр

Veeco Wyko NT 9300 для измерения профиля мембраны. По результату апробирования численного моделирования и эксперимента определены начальные напряжения для всех типов мембран, а также введена поправка модуля Юнга и коэффициента Пуассона для всех исследуемых материалов.

Был произведен аналитический расчет критического давления, то есть давления, при котором происходит разрыв мембраны. Критическое давление $P_{crit}$ оценено с помощью вероятностной функции:

$$F = 1 - exp\left( -\left( \frac{\sigma_{center}(P)}{\sigma_e(P_{crit})} \right)^{m_e} - \left( \frac{\sigma_{edge}(P)}{\sigma_i(P_{crit})} \right)^{m_i} \right),$$

где $F$ — вероятность разрыва мембраны, $\sigma_{center}(P)$ — напряжение фон Мезиса в центре мембраны при давлении $P$, $\sigma_{edge}(P)$ — напряжение фон Мезиса на краю мембраны при давлении $P$, $\sigma_e(P_{crit})$ — напряжение фон Мезиса в центре мембраны при критическом давлении, $\sigma_i(P_{crit})$ — напряжение фон Мезиса на краю мембраны при критическом давлении, $m_e$ и $m_i$ — модули Вейбулла для режимов внешнего и внутреннего разрушения соответственно. Критическое давление $P_{crit}$ было определено из соображений, что $F = 0{,}5$, то есть для вероятности разрыва мембраны 50 %.

***Работа выполнена в рамках реализации программы ЛИЦ «Доверенные сенсорные системы» при финансовой поддержке Минкомсвязи России и АО «РВК» (договор № 009/20 от 10.04.2020, идентификатор 0000000007119P190002).***

***Литература***

1. Shafikov A. et al. Strengthening ultrathin $Si_3N_4$ membranes by compressive surface stress // Sensors and Actuators A: Physical, 2021. Vol. 317. P. 112456.
2. Hohlfelder R. J. Bulge and Blister Testing of Thin Films and Their Interfaces, Stanford University, 1998.

Numerical simulation by the finite element method has been performed using the COMSOL Multiphysics software package. The dependence of the maximum deflection and von Mezis stresses on the magnitude of the excess pressure has been plotted. Membranes of various shapes (round, square, rectangular) and various component compositions (Al, Si, $Si_3N_4$, $SiO_2$, $SiO_2/Si_3N_4$) have been investigated. Numerical calculations have shown good agreement with analytical calculations made according to the formulas [1, 2].

The results of numerical calculations were tested with experimental dependences of the maximum membrane deflection on overpressure. Experimental data were obtained using a test bench, which includes a foreline pump for creating overpressure and a Veeco Wyko NT 9300 optical profilometer for measuring the membrane profile. Based on the results of testing the numerical simulation and experiment, the initial stresses have been determined for all types of membranes, and a correction has been introduced for Young's modulus and Poisson's ratio for all materials under study.

An analytical calculation was made of the critical pressure, that is the pressure at which the membrane ruptures. The critical pressure $P_{crit}$ is estimated using a probability function:

$$F = 1 - exp\left( -\left( \frac{\sigma_{center}(P)}{\sigma_e(P_{crit})} \right)^{m_e} - \left( \frac{\sigma_{edge}(P)}{\sigma_i(P_{crit})} \right)^{m_i} \right),$$

where $F$ is the probability of membrane rupture, $\sigma_{center}(P)$ is the von Mesis stress at the center of the membrane at pressure $P$, $\sigma_{edge}(P)$ is the von Mesis stress at the edge of the membrane at pressure $P$, $\sigma_e(P_{crit})$ is the von Mesis stress at the center of the membrane at critical pressure, $\sigma_i(P_{crit})$ is the von Mezis stress at the membrane edge at critical pressure, $m_e$ and $m_i$ are the Weibull modulus for external and internal failure modes, respectively. The critical pressure $P_{crit}$ was determined on the basis that $F = 0.5$, that is for the probability of membrane rupture of 50 %.

***The work was supported by Minsvyaz RF and RVC JSC (Grant LRC «Trusted Sensor Systems» № 009/20 from 10.04.2020, unique identifier 0000000007119P190002).***

***References***

1. Shafikov A. et al. Strengthening ultrathin $Si_3N_4$ membranes by compressive surface stress // Sensors and Actuators A: Physical, 2021. Vol. 317. P. 112456.
2. Hohlfelder R.J. Bulge and Blister Testing of Thin Films and Their Interfaces, Stanford University, 1998.

УДК 621.382 + 621.793.162 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.570.572

# Семейство установок для МОС-гидридной эпитаксии нитридных гетероструктур. Концепция и верификация

## MOVPE Systems Family for Nitride Heterostructures Epitaxy. Concept and Verification

**Лундин В. В.[1,2], к. ф.-м. н., Заварин Е. Е.[1,2], к. ф.-м. н., Сахаров А. В.[1,3], к. ф.-м. н., Давыдов Д. В.[3,4], к. ф.-м. н., Цацульников А. Ф.[3], д. ф.-м. н.**
*[1] ФТИ им. А. Ф. Иоффе*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru*
*[2] ООО «Монолюм»*
*194214, г. Санкт-Петербург, Костромской пр., 62*
*[3] НТЦ микроэлектроники РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*[4] ООО «Современные вакуумные системы»*
*194223, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 10*

**Lundin W. V.[1,2], Ph.D, Zavarin E. E.[1,2], Ph.D, Sakharov A. V.[1,3], Ph.D, Davydov D. V.[3,4], Ph.D, Tsatsul'nikov A.F.[3], Sc.D**
*[1] Ioffe institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021*
*lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru*
*[2] Monolum Ltd.*
*62 Kostromskoy Ave., St. Petersburg, 194214*
*[3] Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS*
*26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021*
*[4] Advanced Vacuum Systems Ltd.*
*10 Kurchatova St., St. Petersburg, 194223*

Разработана и экспериментально подтверждена концепция установок для МОС-гидридной эпитаксии III-N-гетероструктур с горизонтальными реакторами и принципиально новыми инжекторами газов. Установки оптимизированы для решения различных задач, в том числе для выращивания гетероструктур для электронных применений.
**Ключевые слова:** нитриды III группы; МОС-гидридная эпитаксия; эпитаксиальное оборудование.

The paper considers the concept of MOVPE systems family with horizontal reactors and novel gas injectors for III-N heterostructures epitaxy. MOVPE systems are optimized for various purposes, including epitaxy of heterostructures for electronics applications.
**Keywords:** III nitrides; MOVPE; Epitaxial equipment.

Прогресс в технологии МОГФЭ (МОС-гидридная эпитаксия) III-N связан с развитием эпитаксиального оборудования. Нарастающее понимание процесса

эпитаксии привело к последовательному появлению нескольких все более совершенных поколений III-N МОГФЭ-реакторов. По экономическим причинам эти реакторы оптимизировались для роста InGaN/GaN-гетероструктур, а вместимость реактора непрерывно возрастала. Современные III-N МОГФЭ-реакторы слишком велики для НИОКР и специального производства, а их конструкция неоптимальна для выращивания гетероструктур для электронных применений.

Поэтому в начале 2010-х годов на основе современного понимания процесса МОГФЭ нитридов мы создали установку для III-N МОГФЭ, оптимизированную для НИОКР и опытного производства различных приборных гетероструктур, в том числе для электронных применений. Оптимизация конструкции реактора методами математического моделирования при создании этого реактора, как и последующих, производилась в ООО «СОФТ-ИМПАКТ». Анализ возможных решений показал, что самым стабильным в требуемом широком диапазоне условий является горизонтальный реактор. Однако для таких реакторов характерна низкая однородность по площади подложки. Данная проблема была решена разработкой принципиально нового инжектора газов. Он позволяет не только достичь требуемой однородности, но и существенно поднять скорость эпитаксиального роста III-N-материалов.

В результате была создана установка Dragon-125, успешно эксплуатируемая в НТЦ МЭ РАН [1]. Накопленный опыт позволил разработать новую установку Dragon-175 с увеличенной вместимостью реактора, двузонным индукционным нагревателем, позволяющим управлять радиальным распределением температуры подложкодержателя, расширенными возможностями управления распределением концентрации прекурсоров в реакторе. Нами также разработан дизайн установки Dragon-225 для роста эпитаксиальных структур для электронных применений на подложках диаметром 200 мм, в первую очередь кремниевых.

***Литература***

1. Лундин В. В. и др. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // Научное приборостроение, 2017. — Т. 27. — № 1. — С. 5–9.

Progress in III-N MOVPE is co-related with the development of reactor design. Rising understanding of the epitaxial process results in consequent appearance of more advanced generations of III-N MOVPE reactors. Due to economical reasons, these reactors were optimized for InGaN/GaN epitaxy and the reactor volume was permanently increased. State-of-the-art III-N MOVPE reactors are too large for R&D and low-volume production and their design complicates growth of heterostructures for electronic applications.

Thus in the beginning of 2010s on the basis of modern understanding of the epitaxial process we built III-N MOVPE system, optimized for R&D and pilot production of a variety of III-N heterostructures including those for electronic applications. This and consequent reactors design was optimized using modeling by “Soft-Impact” company.

By analysis of various reactor designs we have concluded that the most stable under required wide range of reactor conditions is a horizontal reactor. However, poor uniformity is typical for such reactors. A novel gas injector has been developed to solve this problem. It allows not only reaching required growth uniformity, but also increasing growth rate.

Dragon-125 epitaxial system built within the frame of this work is successfully used in SHM R&E Center, RAS [1]. The resulting experience allows the development of the new epitaxial system Dragon-175.

The system is equipped with enlarged reactor, double-zone induction heater for radial temperature distribution control, extended capabilities for controlling precursor concentration distribution in the reactor. Also we have designed Dragon-225 MOVPE system for growing epitaxial structures for electronic applications on 200mm substrates, silicon in the first place.

***References***

1. III-N MOVPE reactors: present and future / Lundin W. V. et al. // Nauchnoe priborostroenie, 2017. Vol. 27. № 1. P. 5–9 (In Russian).

УДК 621.383 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.573.574

# Детальное моделирование конструкции установки и характеристик процесса газофазной эпитаксии нитрида галлия из металлоорганических соединений на пластинах кремния диаметром 200 мм

## The Detailed Modeling of the Device Design and Characteristics of the Gallium Nitride Gaseous Epitaxy from Metal Organic Compounds on Silicon Plates dia. 200 mm

**Базаревский Д. С., Калаушина Е. А., к. ф.-м. н., Смирновский А. А., Талалаев Р. А.**
*ООО «СОФТ-ИМПАКТ»*
*194044, г. Санкт-Петербург, пр. Большой Сампсониевский, 64, лит. «Е», оф. 603*
*talalaev@softimpact.ru*

**Bazarevskiy D. S., Kalaushina Ye. A., Ph.D, Smirnovskiy A. A., Talalayev R. A.**

На основе детальной математической модели проведены параметрическое исследование и оптимизация основных элементов дизайна экспериментального образца реактора для газофазной эпитаксии нитрида галлия из металлоорганических соединений «Эпифаз ТМ 200-01».
**Ключевые слова:** нитрид галлия; эпитаксия; реактор; однородность.

Нитрид галлия (GaN) является одним из материалов нового поколения, активно исследуемых производителями силовой электроники как альтернатива традиционным технологиям на основе кремния для целого ряда приложений [1, 2]. Однако, несмотря на уникальные свойства GaN и продемонстрированные многообещающие характеристики приборов на его основе, внедрение этого материала в стандартную производственную цепочку сталкивается с рядом трудностей. Одним из наиболее затратных этапов изготовления транзистора на основе нитрида галлия является газофазная эпитаксия на кремниевой подложке с использованием металлоорганических соединений. Целевые спецификации по чистоте и однородности выращиваемых слоев, а также себестоимости производства пластины налагают соответствующие требования к производительности ростовой установки и возможностям управления и настройки параметров процесса.

В работе анализируется и оптимизируется конструкция экспериментальной установки для роста нитрида галлия на пластинах кремния диаметром 200 мм. Детальная математическая модель описывает течение многокомпонентной газовой смеси в объеме реактора, теплообмен между нагревателем, деталями установки и газом, химические реакции, протекающие в объеме и на внутренних поверхностях реактора, включая рост эпитаксиальных слоев на подложке и паразитное осаждение на стенках реактора.

С помощью параметрических расчетов, проведенных на основе модели, были определены оптимальные размеры проточной части реактора и геометрия газового инжектора, позволяющие обеспечить рост слоев GaN с высокой эффективностью и минимизировать влияние депозитов на стенках реактора на осаждение на подложке.

Разработанная конструкция позволяет гибко управлять однородностью толщины и состава слоев в широком диапазоне параметров процесса.

***Литература***

1. Гольцова М. Мощные GaN-транзисторы: истинно революционная технология // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2012. — № 4 (00118). — С. 86–100.
2. Демидов А. А., Рыбалка С. Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020–2030 гг.) // Прикладная математика и физика, 2021. — Т. 53. — № 1. — С. 53–72.

УДК 533.59 + 546.128 + 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.575.576

# Экспериментальный образец установки газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений «Эпифаз ТМ 200-01» для обработки подложек диаметром до 200 мм

## Experimental Prototype of "Epiphase TM 200-01" System of Metalorganic Vapor Phase Epitaxy for Processing Substrates up to 200 mm in Diameter

**Бирюков М. Г.[1], Одиноков В. В.[1], Афонин П. Е.[1], Шубников А. В.[1], Панин В. В.[1], Устинов В. М.[2], Цацульников А. Ф.[2], Лундин В. В.[3], Заварин Е. Е.[3], Стаценко В. Н.[4], Федотов С. Д.[4], Талалаев Р. А.[5], Базаревский Д. С.[5]**

*[1] АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10*
*vpanin@niitm.ru*
*[2] НТЦ микроэлектроники РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*[3] ООО «Монолюм»*
*194214, г. Санкт-Петербург, Костромской пр., 62*
*[4] АО «Эпиэл»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/2*
*[5] ООО «Софт-Импакт»*
*194044, г. Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 64*

**Biryukov M. G.[1], Odinokov V. V.[1], Afonin P. E.[1], Shubnikov A. V.[1], Panin V. V.[1], Ustinov V. M.[2], Tsatsulnikov A. F.[2], Lundin W. V.[3], Zavarin E. E.[3], Statsenko V. N.[4], Fedotov S. D.[4], Talalaev R. A.[5], Bazarevskii D. S.[5]**

*[1] Reasearch Institute of Precision Machine Manufacturing (NIITM) JSC*
*10 Panfilovsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460*
*vpanin@niitm.ru*
*[2] Submicron Heterostructures for Microelectronics,*
*Research & Engineering Center, RAS*
*26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021*
*[3] Monolum Ltd.*
*62 Kostromskoy Ave., St. Petersburg, 194214*
*[4] Epiel JSC*
*6/2 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[5] Soft-Impact Ltd.*
*64 Bolshoi Sampsonievsky Ave., St. Petersburg, 194044*

Представлены состав, описание основных узлов и принцип работы экспериментального образца установки «Эпифаз ТМ 200-01» газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) для роста III-N-гетероструктур на подложках диаметром до 200 мм.

**Ключевые слова:** МОС-гидридная эпитаксия; III-N-гетероструктуры; силовая электроника; эпитаксиальный рост GaN на Si.

The paper presents the composition, description of the main units and the principle of operation of an experimental prototype of "Epiphase TM 200-01" system for metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) for growing III-N heterostructures on substrates up to 200 mm in diameter.

**Keywords:** MOVPE; III-N heterostructures; power electronics; epitaxial growth of GaN on Si.

В рамках комплексного проекта по соглашению с Минпромторгом РФ АО НИИТМ совместно с НТЦ микроэлектроники РАН, АО «Эпиэл» и ООО «Софт-Импакт» разрабатывают и организуют производство установки газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений [1–3] с роботизированной транспортной системой загрузки-выгрузки подложек диаметром до 200 мм для роста эпитаксиальных слоев и многослойных гетероструктур на основе III-N-соединений (нитриды металлов третьей группы) для устройств силовой электроники.

Экспериментальный образец установки готовится к эпитаксиальному запуску. В докладе приведены сведения о его назначении, технических характеристиках, составе, устройстве и работе.

***Литература***

1. Лундин В. В. и др. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // Научное приборостроение, 2017. — Т. 27. — № 1. — С. 5–9.
2. Лундин В. В. и др. Способ подачи газов в реактор для выращивания эпитаксиальных структур на основе нитридов металлов III группы и устройство для его осуществления / Патент на изобретение RU 2673515 C2. 2018.
3. Lundin W. V. et al. MOVPE of III-N LED structures with short technological process // Technical Physics Letters. 2015. Vol. 41. № 3. P. 212–216.

Within the framework of a comprehensive project by agreement with the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, NIITM JSC together with SHM R&E Center RAS, Epiel JSC and Soft-Impact Ltd have been developing and organizing the production of a metalorganic vapor phase epitaxy system [1–3] with a robotic transport of substrates with a diameter of up to 200 mm for the growth of epitaxial layers and multilayer heterostructures based on III-N compounds for power electronics devices.

An experimental prototype of the system is under preparation for an epitaxial start-up. The report contains information about its purpose, technical characteristics, composition, structure and operation.

***References***

1. Lundin W. V. et al. III-N MOPVE reactors: present and future // Nauchnoe priborostroenie. 2017. Vol. 27. № 1. P. 5–9 (In Russian).
2. Lundin W. V. et al. Sposob podachi gazov v reactor dlya vyraschivania epitaksial'nykh struktur na osnove nitridov metallov III gruppy i ustroistvo dlya ego osuschestvlenia // Patent RU 2673515 C2. 2018 (In Russian).
3. Lundin W. V. et al. MOVPE of III-N LED structures with short technological process // Technical Physics Letters. 2015. Vol. 41. № 3. P. 212–216.

УДК 621.315.592 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.577.578

# Комплексирование линеек отечественного оборудования для текущих и перспективных технологических маршрутов производства ЭКБ

## Complex Domestic Equipment Lines for Current and Prospective Technological Routes for the Production of Electronic Components

**Алексеев А. Н., Петров С. И.**
*ЗАО «НТО»*
*194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27*
*petrov@semiteq.ru*

**Alexeev A. N., Petrov S. I.**
*SemiTEq JSC*
*27 Engels Ave., St. Petersburg, 194156, Russia*
*petrov@semiteq.ru*

Представлены результаты разработки и применения комплексных линеек отечественного технологического оборудования для реализации актуальных маршрутов производства ЭКБ. Обсуждаются особенности изготовления СВЧ-транзисторов и МИС на основе GaN и GaAs, фотоприемных матриц и УФ-светодиодов.
**Ключевые слова:** мощные полевые СВЧ-транзисторы; МИС; QWIP; GaN; GaAs; МЛЭ; электронно-лучевое напыление; термический отжиг; плазмохимия.

The paper presents the results of the development and application of complex lines of domestic technological equipment for realisation of actual routes for the production of electronic components. Besides, it considers the features of manufacturing microwave transistors and MIMC based on GaN and GaAs, QWIP and UV LEDs.
**Keywords:** power microwave transistor; MMIC; QWIP; GaN; GaAs; MBE; e-beam; thermal annealing; ICP-RIE; PECVD.

Для реализации проектов, необходимых для обеспечения технологической независимости России, необходимо провести комплексное оснащение предприятий — изготовителей ЭКБ линиями оборудования отечественного производства. При этом нужно учитывать что при проведении технического перевооружения все чаще возникает необходимость поставки не только технологического оборудования, но и сопутствующих базовых технологических процессов.

ЗАО «НТО» (SemiTEq™) более 20 лет специализируется на разработке и производстве высокотехнологичного сверхвысоковакуумного и высоковакуумного оборудования для проведения комплекса ключевых технологических операций при изготовлении ЭКБ для СВЧ-микроэлектроники и оптоэлектроники на основе материалов $A^3B^5$. Для разработки базовых технологических процессов в ЗАО «НТО» было создано и на протяжении более десяти лет функционирует специальное подразделение — прикладная лаборатория. Технологи лаборатории осуществляют углубленное тестирование оборудования, подтверждают возможность технической реализации клиентоориентированных и новых перспективных технологических

процессов, осуществляют финальную технологическую инсталляцию оборудования и обеспечивают сервисную поддержку.

В данном докладе представлены результаты разработки и применения отечественного оборудования, объединенного в комплексные технологические линейки для производства ЭКБ. Обсуждаются особенности изготовления транзисторов и МИС СВЧ-диапазона на основе GaN и GaAs, фотоприемных матриц, УФ-светодиодов и других устройств.

Рассмотрены технические особенности и возможности для использования в указанных маршрутах установок молекулярно-лучевой эпитаксии, термического отжига, электронно-лучевого и магнетронного напыления, а также установок плазмохимического травления и осаждения, серийно выпускаемых ЗАО «НТО». Проводится сравнение с зарубежными аналогами.

Кроме того, представлены планы по разработке технологических установок, в том числе с использованием мер государственной поддержки, зарубежные аналоги которых необходимо заместить в первую очередь для применения как в текущих, так и перспективных технологических маршрутах.

Продемонстрированы результаты использования отечественного оборудования в производственных циклах АО «Светлана-Рост» и ряда других отечественных предприятий — производителей ЭКБ. В частности, в мощных СВЧ-транзисторах на основе GaN была продемонстрирована плотность мощности до 6,5 Вт/мм и до 5,5 Вт/мм на 28 В на частотах 3 и 10 ГГц соответственно. Транзисторы с периферией 3,5 мм продемонстрировали стабильную работу в течение более 1000 часов на мощности 18 Вт на частоте 3 ГГц (напряжение питания 45 В).

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.579.582

# Современные требования к ионным имплантерам на большие и средние токи и пути их реализации

## Modern Requirements for Ion Implanters for High and Medium Currents and Ways of Their Implementation

**Кривенко А. С., Безруков И. А.**
*ООО «ЭПОС-Инжиниринг»*
*630090, г. Новосибирск, ул. Демакова, 27/1*
*office@epos-nsk.ru*

**Krivenko A. S., Bezrukov I. A.**
*LLC EPOS-Engineering*
*27/1 Demakova St., Novosibirsk, 630090*
*office@epos-nsk.ru*

Разрабатываются имплантеры для процессов ионного легирования и формирования структур «кремний на изоляторе». Анализируются технические требования к перспективному компактному имплантеру и конструктивные особенности. Созданы ионные источники с малой расходимостью пучка и большим ресурсом работы.
**Ключевые слова:** имплантер; ионный источник; КНИ; технологическое оборудование.

Ion implanters are being developed for the processes of ion doping and the formation of silicon-on-insulator structures. The technical requirements for a promising compact implanter and design features have been analyzed. Ion sources with a low beam divergence and a large operating resource have been created.
**Keywords:** implanter; ion source; SOI; technological equipment.

Основную долю рынка занимают имплантеры на токи до 30 мА с регулировкой энергии ионов от 5 до 200 кэВ. Имплантеры с токами до 5 мА имеют энергию 200 эВ — 900 кэВ.

Разработка линейки имплантеров ведется в «ЭПОС-Инжиниринг», имеющем опыт создания источников ионов и электронов с энергиями до 100, 300 кэВ и другого оборудования. Рассматриваются задачи ионного легирования и формирования структур «кремний на изоляторе» (КНИ), синтез светоизлучающих наноструктур.

Мы заинтересованы в обсуждении требований к перспективному имплантеру, конструктивных решений.

Процессы легирования наиболее требовательны к однородности дозы < 1,5 %, повторяемости дозы < 1,5 % (по пластинам, изо дня в день), энергии < 3,0 %, углу имплантации <1°. Загрязнение частицами ≤ 5 @ 0,042 мкм, тяжелыми металлами — ≤ 1E9 см$^{-2}$. Срок службы источника ионов > 100–500 часов. Время изменения иона или энергии < 3 минут.

Требования достигаются за счет применения питания на базе высокочастотных резонансных инверторов, микроконтроллеров и обратных связей. Смена газа и энергии пучка сопровождается программной настройкой подсистем.

Коллективом неоднократно успешно реализована автоматизация специального технологического оборудования и управление технологическим процессом в реальном времени на базе ПЛК и промышленного компьютера.

Отсутствие углеводородов обеспечивается безмасляной откачкой и минимизацией эластичных уплотнений. Избежание загрязнения металлами требует тщательного расчета, замены нержавеющей стали в ионном источнике и диафрагмах на специально подобранные материалы (графит и тантал и пр.). В ионном источнике нежелательно использовать молибден, т. к. ионы $^{98}Mo^{2+}$ не различаются сепаратором из-за аналогичного отношения заряда к массе с $BF_2^+$.

Моделирование условий транспортировки пучка осуществлялось нами с использованием программ PBGUNS (траектории), CreatVac (вакуум-газ), COMSOL (распределение полей).

Производители имплантеров отказываются от одновременной обработки пластин на вращающемся диске-кассете из-за трудностей охлаждения пластин, регулировки угла. Было обнаружено разрушение миниатюрных затворов при попадании частиц из-за быстрого вращения. На смену пришли конечные станции на одну подложку, осуществляющие последовательную имплантацию с роботизированной загрузкой.

Для борьбы с энергетическим загрязнением нейтралами перезарядки и ионами установлен отклоняющий энергетический фильтр. На основе опыта коллектив разрабатывает высокочастотный генератор плазмы для компенсации поверхностного заряда на подложке.

Нами разработан вдвижной детектор однородности тока пучка, составленный из матрицы цилиндров Фарадея (200 шт.) с шагом 10 мм, диаметр анализа — 150 мм.

Имплантер совместим с различными типами источников ионов. Нами создан бесфиламентный источник газовых ионов на электронном циклотронном резонансе. Плазма в нем образуется при взаимодействии СВЧ-волны с газом в магнитном поле. Источник может работать непрерывно в течение недели и без обслуживания годами. Энергия (до 50 кэВ) и ток пучка независимо плавно регулируются.

Другой источник с самонагревающимися катодами из LaB6 разработан для пучков газа с высокой плотностью эмиссии (до 0,6 А/см$^2$). Этот тип источника может получать пучок высокой яркости из твердого бора.

Имплантер будет оснащен датчиками утечек, принудительной вентиляцией, блокировками, сухими скрубберами. Возможно хранение и доставка газов-допантов при давлениях меньше атмосферного.

Требования к имплантерам для структур КНИ упрощаются. От скрубберов, контроля параллельности пучка можно отказаться. Сепаратор, ускоряющая секция, блоки питания могут совпадать с разработанными для легирования.

Производство в России современной линейки имплантеров усилит позиции производителей электронной продукции.

***Литература***

1. Felch S. B. et al. Ion implantation for semiconductor devices: The Largest Use of Industrial Accelerators // Proceeding of PAC, 2013. Pasadena, CA USA.

The main market share is occupied by implanters for currents up to 30 mA with ion energy regulation from 5 to 200 keV. Implanters with currents up to 5 mA have an energy of 200 eV — 900 keV.

The development of a line of implanters has been carried out at EPOS-Engineering, relying on the experience of creating sources of ions and electrons with energies up to 100, 300 keV and other equipment. Problems of ion doping and formation of silicon on insulator (SOI), synthesis of light-emitting nanostructures have been considered.

We are interested in discussing the requirements for a promising implanter and design features.

Doping processes are most demanding on dose uniformity < 1.5 %, dose repeatability < 1.5 % (plates, day to day), energy < 3.0 %, implantation angle < 1°. Particle contamination is ≤ 5 @ 0.042 μm, heavy metals is ≤ 1E9 cm-2. Ion source service life is > 100–500 hours. Ion or energy change time is < 3 minutes.

Requirements are achieved through the use of power supply based on high-frequency resonant inverters, microcontrollers and feedback loops. Change of gas and beam energy is accompanied by program setting of subsystems. Our team has repeatedly and successfully implemented the automation of special technological equipment and control of the technological process in real time based on a PLC and an industrial computer.

The absence of hydrocarbons is ensured by oil-free pumping and minimized elastic seals. Avoiding metal contamination requires careful design, replacing stainless steel in the ion source and diaphragms with specially selected materials (graphite and tantalum, etc.). It is undesirable that molybdenum should be used in the ion source, because $^{98}Mo^{2+}$ ions are not distinguished by the separator due to the similar charge-to-mass ratio with BF2+.

We simulated the conditions for beam transportation using the PBGUNS (trajectory), CreatVac (vacuum-gas), COMSOL (field distribution) programs.

Implant manufacturers refuse to simultaneously process the wafers on a rotating disk-cassette due to the difficulties of cooling the wafers, adjusting the angle. The destruction of miniature gates was detected when particles hit due to rapid rotation. They were replaced by end stations with a single substrate that perform sequential implantation with robotic loading.

A deflecting energy filter is installed to eliminate energy contamination with recharge neutrals and ions. Based on the experience, the team develops a high-frequency plasma generator to compensate for the surface charge on the substrate.

We have developed a slide-in detector of the uniformity of the beam current, composed of a matrix of Faraday cups (200 pcs) with a step of 10 mm, the analysis diameter being 150 mm.

The implanter is compatible with various types of ion sources. We have created a filament-free source of gas ions based on electron cyclotron resonance. Plasma in it is formed by the interaction of GHz wave with a gas in a magnetic field. The source can work continuously for a week and without maintenance for years. The energy (up to 50 keV) and the beam current are independently adjustable.

Another source with self-heating LaB6 cathodes is designed for gas beams with a high emission density (up to 0.6 A/cm$^2$). This type of source can receive a high brightness beam from solid boron.

The implanter will be equipped with leak sensors, forced ventilation, interlocks, dry scrubbers. Storage and delivery of dopant gases at pressures less than atmospheric are possible.

The requirements for implanters for SOI structures are simplified. Scrubbers, beam parallelism control can be dispensed with. Separator, accelerating section, power supplies can match those designed for doping.

The production of a modern line of implanters in Russia will strengthen the position of manufacturers of electronic products.

***References***

1. Felch S. B. et al. Ion implantation for semiconductor devices: The Largest Use of Industrial Accelerators. Proceeding of PAC2013, Pasadena, CA USA.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.583.584

# Конфигурируемая модульная тестовая платформа TXI для измерения и контроля статических и динамических параметров полупроводниковых приборов

## Configurable Modular TXI Test Platform for Measuring and Monitoring Static and Dynamic Parameters of Semiconductor Devices

**Шустров А. В.**
*ООО «ФОРМ»*
*119530, г. Москва, Очаковское ш., 34, этаж 1, помещение I, комната 16*
*info@form.ru*

**Shustrov A. V.**
*FORM Co. Ltd*
*34 Ochakovskoe Ave., Moscow, 119530, Russia*
*info@form.ru*

Представлены результаты промежуточного этапа разработки конфигурируемой модульной тестовой платформы TXI и тестеров FORMULA TXI SD на ее основе для комплексной автоматизированной проверки статических и динамических параметров полупроводниковых приборов широкой номенклатуры в диапазоне 4 кВ / 300 А. Отмечены основные технические характеристики и функциональные возможности тестеров на базе платформы TXI. Показаны преимущества применения тестеров TXI SD на этапах разработки, производства, испытаний и входного контроля ЭКБ.

**Ключевые слова:** тестовая платформа; контрольно-измерительное оборудование; полупроводниковые приборы; измерение энергии лавинного пробоя; измерение зарядовых и емкостных характеристик; измерение времен; измерение динамических характеристик.

В целях удовлетворения возрастающих и динамически меняющихся потребностей предприятий отрасли при освоении новых полупроводниковых приборов, включая силовые транзисторы и модули, предложена новая концепция реализации автоматизированного тестового оборудования на базе конфигурируемой модульной платформы TXI.

Разрабатываемые Тестеры на базе платформы TXI (Тестеры TXI SD) гарантируют полное метрологическое соответствие заявленных характеристик и позволяют:

- конфигурировать систему различными существующими и вновь разрабатываемыми измерительными модулями и коммутационными матрицами под задачи потребителя;
- программировать параметры входных воздействий на объект контроля (транзисторов, диодов, стабилитронов, тиристоров, оптопар, диодных и транзисторных сборок) по длительности и напряжению тока до 4 кВ / 300 А на пластине и в корпусе;

- проводить измерения статических и динамических параметров в едином цикле измерений по универсальному протоколу информационного обмена на основе SCPI-команд;
- обеспечивать простую интеграцию с внешними приборами и оборудованием (зондовыми станциями, проходными камерами, разбраковщиками);
- поддерживать мультисайтный режим измерения кристаллов на пластине до 16 сайтов с временем измерения не более 50 мс на сайт;
- создавать новые методы контроля и управлять коммутационными матрицами в среде открытого программного обеспечения;
- измерять статические характеристики полупроводниковых приборов, включая режим измерения малых токов;
- измерять емкостные, зарядовые и временные характеристики биполярных, полевых и БТИЗ-транзисторов;
- проводить испытания мощных транзисторов и модулей энергией лавинного пробоя;
- исследовать объекты контроля со снятием вольт-амперных, вольт-фарадных и других характеристик;
- проводить автоматическую диагностику и калибровку тестеров, автоматическое формирование протоколов измерений.

Тестеры TXI SD на базе конфигурируемой универсальной тестовой платформы TXI обеспечивают высокий уровень комплексной автоматизации всех этапов процесса измерений статических и динамических параметров полупроводниковых приборов, надежность в круглосуточном режиме работы и учитывают современные потребности электронной промышленности России при измерении полупроводниковых приборов.

***Литература***

1. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. — Введ 01.01.1996.
2. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.12.2019 № 3457 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы».

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.585.586

# Экспериментальная эксплуатация турбомолекулярного насоса VEGA PROvac 1500 в составе вакуумной камеры

## Experimental Operation of the VEGA ProVac 1500 Turbomolecular Pump as Part of a Vacuum Chamber

**Кочетков А. Ю.[1], Братской В. Л.[1], Костецкий Н. И.[1], Неверов В. С.[2], Ширяев И. А.[2], Кобозев С. В.[2]**
*[1] АО «НПО им. С. А. Лавочкина»*
*г. Химки*
*[2] ООО «Владимирский центр механической обработки»*
*г. Владимир*

**Kochetkov A. Yu.[1], Bratskoy V. L.[1], Kostetskiy N. I.[1], Neverov V. S.[2], Shiryaev I. A.[2], Kobozev S. V.[2]**
*[1] "NPO named after S. A. Lavochkin" JSC*
*Khimki*
*[2] "Vladimir Center of Mechanical Processing" LLC*
*Vladimir*

В статье рассматривается вопрос об опытной эксплуатации предсерийного образца турбомолекулярного насоса (ТМН) VEGA PROvac 1500 в составе вакуумной камеры. Данный насос прошел полный цикл заводских испытаний, но для получения статистики по работе в различных условиях эксплуатации необходимо проверить его работоспособность в реальных условиях.

The article deals with the issue of trial operation of a pre-production sample of the VEGA ProVac 1500 turbomolecular pump (TMN) as part of a vacuum chamber. This pump has passed a full cycle of factory tests, but in order to obtain statistics on operation in various operating conditions, it is necessary to check its operability in real conditions.

Одним из перспективных направлений является разработка российских высоковакуумных турбомолекулярных насосов производительностью от 1500 л/с. На сегодняшний день в России не выпускаются насосы с такой производительностью. Серийное производство данных насосов обладает следующими преимуществами:

- стоимость ниже зарубежных аналогов;
- гарантийное и постгарантийное обслуживание;
- поставки в течение трех дней;
- увеличенная гарантия до 18 месяцев.

Испытательная установка представляет собой кубическую вакуумную камеру с размером 800 мм и объемом 512 литров. Испытания проводились путем установки турбомолекулярного насоса на посадочное место вакуумной камеры. В начале эксперимента производилась предварительная откачка вакуумной камеры механическим насосом. Далее на давлении $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. включался ТМН. Давление в вакуумной камере фиксировалось вакуумметром с частотой один раз в минуту.

Откачка турбомолекулярным насосом производилась в течение нескольких часов. По истечении времени ТМН выключался.

В результате испытаний получены необходимые технические характеристики, которые сравнивались с характеристиками ТМН иностранного производства сравнимой производительности.

***Литература***

1. Демихов К. Е., Панфилов Ю. В., Никулин Н. К. и др. Вакуумная техника: справочник / Под общ. ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2009. — 590 с., ил.

One of the promising areas is the development of Russian high-vacuum turbomolecular pumps with a capacity of 1500 l/s. To date, pumps with such a capacity are not produced in Russia. Serial production of these pumps has the following advantages:

- the cost is lower than that of foreign analogues;
- warranty and post-warranty service;
- delivery within 3 days;
- extended warranty up to 18 months.

The test unit is a cubic vacuum chamber with a size of 800 mm and a volume of 512 liters. The tests were carried out by installing a turbomolecular pump on the seat of the vacuum chamber. At the beginning of the experiment, the vacuum chamber was pre-pumped by a mechanical pump. Then, at a pressure of $2.5 \cdot 10^{-2}$ mm Hg, the TMN was turned on. The pressure in the vacuum chamber was recorded by a vacuum meter with a frequency of 1 time per minute. Pumping by a turbomolecular pump was carried out for several hours. After the time expired, the TMN was turned off.

As a result of the tests, the necessary technical characteristics were obtained, which were compared with the characteristics of foreign-made TMN of comparable performance.

***References***

1. Demikhov K. E., Panfilov Yu. V., Nikulin N. K. et al. Vacuum technology: a reference book / Under the general editorship of K. E. Demikhov, Yu. V. Panfilov. 3rd ed., reprint. and enlarged. M.: Mashinostroenie, 2009. 590 p.

УДК 536 + 621.37 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.587.588

# Новые технологические решения лазерной обработки материалов электронной техники

## New Technological Solutions for Laser Processing of Electronic Equipment

**Горный С. Г., к. т. н., Юдин К. В., Юревич В. И., к. ф.-м. н.**
*ООО «Лазерный Центр»*
*195176, г. Санкт-Петербург, Пискаревский пр., 25, пом. 132*
*optic@newlaser.ru*

**Gornyy S. G., Ph.D, Yudin K. V., Yurevich V. I., Ph.D**

Разработаны промышленные лазерные станки для обработки материалов электронной техники. Высокие характеристики получены за счет реализации принципа бесконечного поля зрения, сочетающего перемещение объекта линейными приводами и угловое сканирование лазерного пучка через специальный объектив, что позволяет создавать оцифрованные решения для различных технологий обработки материалов.
**Ключевые слова:** лазерная микрообработка; позиционирование пучка.

Позиционирование пучка на объекте, перемещаемом линейными приводами совместно с угловым сканированием лазерного пучка через объектив с малой ошибкой телецентричности, обеспечивает сочетание точности и скорости, необходимых для обработки материалов электронной техники и позволяет реализовать экстремально сложные геометрии 3D-объектов при столь же экстремальном многообразии режимов обработки.

Требуемый размер пучка в зоне обработки дает числовую апертуру фокусировки, определяющую возможное фокусное расстояние, размер поля сканирования и минимальную ошибку телецентричности. Анализ показывает, что в двухзеркальных сканерах помимо дисторсии объектива присутствует нелинейность самого сканера, а реализация нулевой ошибки телецентричности по обеим осям невозможна, однако ее допустимая величина обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния объектива. Стандартные конфигурации станков работают с волоконными лазерами на 1,06 мкм и оптикой с апертурами от 0,02 до 0,1, что позволяет получить размеры сфокусированного пучка от 10 до 50 мкм в полях сканирования от 20×20 до 100×100 мм$^2$ с максимальной ошибкой телецентричности 2–5°. Соотношение между размерами поля сканирования и обрабатываемых объектов формирует требование к ходам линейных приводов, которые, в принципе, могут быть любыми. Калибровка обоих полей производится с помощью системы машинного зрения и специального программного пакета, что позволяет получить суммарную ошибку воспроизведения абсолютных координат в единицы микрометров при максимальных ходах линейных двигателей и углах сканирования.

Для стандартного импульса с энергией 1 мДж и длительностью 100 нс плотность мощности на объекте обработки превышает $10^8$ Вт/см$^2$, что обеспечивает испарительный режим удаления материала и дает высокое качество обработки с минимальными размерами зоны термовлияния (от 1 до 15 мкм). Сложность

высокоточного получения объектов с малыми размерами заключается в том, что большинство участвующих в этом технологических процессов реализуются при близких параметрах лазерного пучка: размере 10–50 мкм, длительности импульсов 2–100 нс, частоте повторения импульсов 1–1000 кГц. Скорость позиционирования лежит в пределах 1–10 м/с. Приведенные к ней пространственные фронты импульса и инерционные задержки равны соответственно 2–20 и 10–100 мкм. Программное разрешение системы составляет 1–2 мкм. Поэтому получить сопоставимое аппаратное разрешение для масштабов обработки 100 мкм с абсолютной ошибкой, не превышающей 10 мкм, возможно только с тщательным моделированием процесса обработки и подбором алгоритмов управления пространственно-временными характеристиками пучка и его позиционирования.

Оцифрованные технологические решения реализованы в промышленных станках линии «МикроСЕТ РА». Они обеспечивают создание топологий с размерами элементов до 20 мкм методом контролируемого удаления металлических (медь, алюминий, серебро, золото и др.) слоев, нанесенных на подложку, сверления отверстий диаметром от 30 мкм с производительностью до 2000 отв/мин в стандартных подложках из керамических материалов (поликор, ситаллы, нитрид алюминия, LTCC и др.), резки и скрайбирования широкого круга материалов, формирования трехмерных поверхностных структур в полупроводниковых материалах с размерами элементов до 20 мкм.

УДК 621.382.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.589.592

# Оборудование для устранения субмикронных дефектов

## Equipment for Elimination of Submicron Defects

**Плебанович В. И., к. т. н.**
***Зам. генерального директора***
*Vpleba@kbtem-omo.by*

**Аваков С. М., д. т. н.**
***Генеральный директор***
*ASM@planar.by*

*ОАО «Планар»*
*Республика Беларусь, 220033, г. Минск, Партизанский просп., 2*

**Plebanovich V. I., Ph.D**
***Deputy General Director***
*Vpleba@kbtem-omo.by*

**Avakaw S. M., Sc.D**
***General Director***
*ASM@planar.by*

*"Planar" JSC*
*2 Partizansky Ave., 220033, Minsk, Republic of Belarus*

**Ключевые слова:** микродефект; автоматический контроль; микросхема; абляция; осаждение.

Разработка интегральной микросхемы заканчивается выводом данных для создания комплекта фотошаблонов. Комплект фотошаблонов содержит полную информацию о топологии разработанной микросхемы. Любые дефекты в фотошаблоне искажают исходную информацию и приводят к ее забракованию [1]. Поиск и устранение выявленных дефектов является важной и трудной задачей.

Типовой маршрут изготовления фотошаблона — генерация изображения в фоторезисте, проявление, травление, автоматический контроль изображения фотошаблона на соответствие проектным данным и устранение дефектов. Чем выше разрешающая способность установок автоматического контроля, тем меньше размер дефектов обнаруженных на фотошаблоне. В результате установка автоматического контроля готовит протокол дефектов, состоящий из информации о координатах дефектов. Этой информации достаточно, чтобы приступить к его ремонту.

В настоящий момент мы поставляем две модификации [2] установок автоматического контроля фотошаблонов: ЭМ-6729Б под проектные нормы 65 нм и ЭМ-6729 под проектные нормы 130 нм (рис. 1).

Следующей важной операцией является устранение выявленных дефектов. Для этого проверенный фотошаблон переносится на установку лазерного удаления дефектов совместно с дефектной ведомостью.

**Рис. 1.** Установка автоматического контроля топологии фотошаблонов ЭМ-6729

Способ устранения дефекта зависит от вида дефекта и проводится в полуавтоматическом режиме. Программное обеспечение упрощает оператору выполнение рутинных операций. Установка за счет анализа видеоизображения позволяет автоматически определить края дефекта. Точность автоматического определения границы — 5 нм, что выше, чем это может быть сделано вручную (50 нм). Это крайне важно, когда необходимо удалить дефект в топологической структуре с плотным размещением элементов.

На основании алгоритмов автоматического анализа топологии был разработан процесс устранения сложных дефектов, когда восстанавливаемая топология не является явной. На рис. 2 представлены результаты ремонта топологии, представляющие собой кривую линию.

*Перед ремонтом* *Результат ремонта*

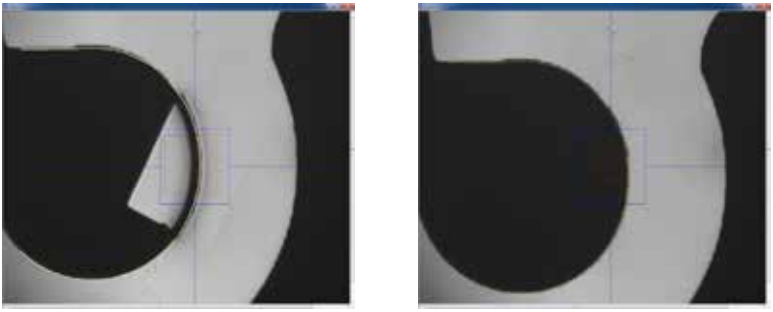


**Рис. 2.** Ремонт топологии, представляющей кривую линию

Иногда бывает нужно удалить дефект после того, как фотошаблон был защищен пелликулами. Наши специалисты разработали технологический процесс удаления дефектов без снятия пелликулы.

Наши заказчики могут выбрать из двух моделей установок лазерного устранения дефектов — ЭМ-5231 [3] (рис. 3) и ЭМ5131 [4] (рис. 4). Сводная таблица параметров установок лазерного устранения дефектов фотошаблонов приведена в табл. 1.

**Рис. 3.** Установка лазерного устранения дефектов фотошаблонов ЭМ-5231

**Рис. 4.** Установка лазерного устранения дефектов фотошаблонов ЭМ-5131

**Табл. 1.** Сравнение параметров установок лазерного устранения дефектов фотошаблонов

| Параметры | ед. изм. | ЭМ-5231 | ЭМ-5131 |
|---|---|---|---|
| Размер минимального изолированного дефекта | нм | 150 | 200 |
| Осаждение | нм | да | да |
| Устранение дефектов через пелликулу | | да | - |
| Копирование топологии | | да | да |
| Максимальный размер шаблона | | 9” | 6” |

Наибольшей популярностью среди наших заказчиков пользуется модель ЭМ-5231, которая, по оценке зарубежных специалистов, на основе независимого тестирования по совокупности технических параметров превосходит модель Sculptor фирмы V-TEC, Япония, и Eagle fpIII фирмы RAVE, США. За последние годы нами выполнены поставки для фирм PDMCX, г. Сямынь; Photronics, г. Бойзе, США;

SiEn, г. Циньдао; ведутся переговоры и с другими ведущими производителями фотошаблонов.

Выводы:

- применение фемтосекундного лазера позволяет проводить ремонт фотошаблонов без повреждений;
- лазерные системы обладают высокой производительностью и универсальностью;
- одновременное устранение на установке прозрачных и непрозрачных дефектов позволяет экономить время проведения операции ремонта, площадь чистого помещения и затраты на обслуживание оборудования;
- функция оценки линейных размеров позволяет оценить качество выполненного ремонта.

***Литература***

1. Плебанович В. И. Автоматический контроль микродефектности на полупроводниковых пластинах // Электроника: НТБ, 2015. — № 5 (00145). — С. 132–140.
2. http://kb-omo.by/content/view/109/94.
3. http://kb-omo.by/content/view/1041/567.
4. http://kb-omo.by/content/view/114/99.

УДК 628.1 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.593.596

# Специальные технологии подготовки деионизованной воды. Особенности проектирования и методы оптимизации

## Special Technologies for the Preparation of Deionized Water. Design Features and Optimization Methods

**Сафонова Д. А.**
*АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР»*
*105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 1*
*Safonova@mediana-filter.ru*

**Safonova D. A.**
*"RPC MEDIAN-FILTER" JSC*
*1 Tkatskaya St., Moscow, 105318*
*Safonova@mediana-filter.ru*

В докладе рассмотрены специальные технологии получения деионизованной воды для предприятий микроэлектронной отрасли, основанные на мембранных методах очистки. Приведены особенности проектирования систем водоподготовки и методы их оптимизации.
**Ключевые слова:** деионизованная вода; получение деионизованной воды; водоподготовка для микроэлектронной отрасли.

The report discusses special technologies for obtaining deionized water for enterprises of the microelectronic industry based on membrane purification methods. The features of designing water treatment systems and methods of their optimization have been given.
**Keywords:** deionized water; production of deionized water; water treatment for the microelectronic industry.

В электронной отрасли деионизованная вода является основой технологического процесса (производство печатных плат, интегральных микросхем, полупроводников, солнечных батарей и пр.). Помимо основного назначения специально подготовленная вода применяется во вспомогательном оборудовании — системах охлаждения, вентиляции и пр.

К воде, используемой в электронной промышленности, предъявляются максимальные требования по глубине обессоливания, очистке от частиц, коллоидов и микроорганизмов. Основными стандартами, регламентирующими качество воды, являются: ОСТ 11-029.003-80 «Изделия электронной техники. Вода, применяемая в производстве. Марки, технические требования, методы очистки и контроля»; Института полупроводниковой техники и материалов (Semiconductor Equipment and Materials Institute — SEMI) Американского сообщества по испытанию материалов (ASTM D5127); ГОСТ Р 58431-2019 «Вода для гальванического производства и схемы промывок»; ГОСТ Р 58144-2018 «Вода дистиллированная», СаНПиН 2.1.3684-21. В зависимости от целей использования требуется вода нескольких типов: А, Б, Е-1 и пр.

Требуемое качество деионизованной воды обеспечивается за счет применения комбинации традиционных методов очистки — механической и угольной

фильтрации, ионного обмена, в т. ч. умягчения и обработки на фильтрах смешанного действия (ФСД), и современных безреагентных методов на базе интегрированных мембранных технологий (ультрафильтрация, обратный осмос, электродеионизация).

Водоподготовка — многостадийный процесс, где каждая предыдущая стадия направлена на повышение эффективности работы последующей и в конечном итоге на получение ультрачистой воды необходимого качества. Станцию водоподготовки можно разделить на три основных блока:

- блок предварительной подготовки (фильтрация, обезжелезивание, умягчение, дехлорирование и т. п.);
- блок основного обессоливания (обратный осмос, ионный обмен, электродеионизация и т. п.);
- блок финишной очистки и распределения (фильтры смешанного действия, станция ультрафиолетовой обработки и т. п.).

**Рис. 1.** Принципиальная схема получения ультрачистой воды. Схема включает: механический фильтр обезжелезивания, сорбционный угольный фильтр, фильтр умягчения, двухступенчатую установку обратного осмоса, установку электродеионизации (ЭДИ)

Рассмотрим подробнее различные технологии обессоливания: ионный обмен, обратный осмос и электродеионизацию. Ионный обмен применяется в водоподготовке для очистки воды от солей жесткости (умягчение), снижения содержания углекислоты (декарбонизация), снижения содержания растворенных солей (опреснение, обессоливание), селективного удаления отдельных загрязнений. В блоках предварительной подготовки ионный обмен используется для удаления солей жесткости перед обратноосмотической установкой и, что особенно важно, при установленной далее по схеме установке электродеионизации. В схемах с одноступенчатым обратным осмосом и электродеионизацией рекомендуется двухступенчатое умягчение; в схемах с двухступенчатым обратным осмосом и электродеионизацией — одноступенчатое умягчение или переход на дозирование антискалантов (ингибиторов отложения солей на поверхности мембранных элементов). Использование антискалантов вместо умягчения оправданно при жестком ПДК по остаточному содержанию натрия в ультрачистой воде и большой производительности.

Технология обратного осмоса наряду с микрофильтрацией является одной из наиболее часто применяемых технологий мембранного разделения. Она широко используется для обессоливания (опреснения) всех типов вод. Обратный осмос позволяет удалять из воды растворенные соли, неорганические и органические вещества с молекулярной массой свыше 100 Да. В зависимости от необходимого для потребителя качества воды установки обратного осмоса могут быть одно- или

двухступенчатыми, причем пермеат с первой ступени очистки подается на вход второй ступени в качестве питающей воды.

Электродеионизация — это процесс непрерывной деминерализации воды с использованием ионообменных смол, ионоселективных мембран и постоянного электрического поля. Разность потенциалов обеспечивает перенос растворенных ионов из потока воды через ионоселективные мембраны и одновременно с этим непрерывную регенерацию ионитов. Поэтому все чаще метод применяется в качестве основной финишной стадии для глубокой доочистки предварительно обессоленной воды как безреагентная альтернатива для замены ионного обмена. При конверсии 95% обработанная вода достигает удельного сопротивления на уровне 18 МОм·см.

Важным этапом в производстве компонентов электронной отрасли является хранение и доставка потребителям деионизованной воды требуемого качества. Системы распределения должны быть выполнены из высококачественных инертных полимерных материалов, обладающих стойкостью к химическому воздействию и высокой ударной вязкостью.

При проектировании станций водоподготовки применяется комплексный подход. Целесообразно разделить потребителей на группы по качеству потребляемой воды (от минимальной степени очистки к максимальной) и проводить подготовку и отбор разного качества воды по блокам:

- предподготовка, умягчение — отбор на хозяйственно-бытовые нужды, кондиционеры, увлажнители;
- обратный осмос, первая ступень, в т. ч. с подмесом, — отбор на кондиционеры, увлажнители;
- обратный осмос, вторая ступень, EDI — получение воды с качеством 1–10 МОм·см для лабораторий, прачечных, гальваники и т. п.;
- блок доочистки и поддержания качества — подача в точки потребления технологическим оборудованием.

При проектировании систем получения, доочистки и поддержания качества деионизованной воды следует учитывать ряд дополнительных факторов:

- применение теплообменников, обеспечивающих гарантированную температуру деионизованной воды в точках потребления;
- применение оптимально подобранных систем предварительной подготовки, направленных на максимальное снижение макропримесей, соблюдение требований, предъявляемых к исходной воде установками финишной очистки, улучшение эффективности их работы и продление срока службы оборудования и расходных элементов;
- использование материалов и оборудования систем хранения и распределения, не оказывающих влияния на качество деионизованной воды и обеспечивающих защиту от микробиологического заражения и попадания посторонних примесей, — инертные пластики, санитарная арматура и пр.;
- применение технологий и методов, поддерживающих качество воды на всех стадиях очистки, хранения и распределения (использование ультрафиолета и озона, организация систем дыхания емкостей с наддувом инертного газа, обеспечение турбулентного режима течения воды в трубопроводах, оптимальных скоростей фильтрации и т. п.);

- контроль и мониторинг процесса производства, хранения и распределения ультрачистой воды по показателям удельной электропроводности, общего органического углерода и других факторов.

Исходя из качества исходной воды и требований к качеству воды, поступающей на установку получения деионизованной воды, определяются типы фильтров предварительной подготовки, рассчитываются их объемы и режимы работы. Исходя из максимального потока воды на установку водоподготовки и объемов воды, необходимой для регенерации фильтров, рассчитывается насосная станция подачи исходной воды, объем входной емкости. Производится подбор контрольно-измерительных приборов, запорно-регулирующей арматуры и вспомогательного оборудования.

Выводы: в заключение следует отметить, что система водоподготовки неразрывно связана со всеми основными разделами проекта (технологией; водоснабжением и канализацией; отоплением, вентиляцией и кондиционированием; архитектурными решениями; воздухоснабжением; освещением и силовым электрооборудованием) и является одной из его ключевых частей.

***Литература***

1. Федотов А. Е. Чистые помещения. — М., 2021. — 528 с., ил.
2. Дроздова А. В., Царьков С. Е., Васильев В. И., Сафонова Д. А., Ломая Т. Л., Системы водоподготовки воды и пара // Технология чистоты, 2016. — № 2/2016. — С. 19–25.
3. Пантелеев А. А., Рябчиков Б. Е., Хоружий О. В., Громов С. Л., Сидоров А. Р. Технологии мембранного разделения в промышленной водоподготовке. — М.: ДеЛи плюс, 2012. — 429 с.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.597.598

# Электротермотренировка ЭКБ. Конфигурируемые комплексы для обеспечения требуемых режимов и производительности

## Electric Processing ECB. Configurable Complexes to Provide the Required Modes and Performance

**Герасименко Ю. В.**
*ООО «ФОРМ»*
*119530, г. Москва, Очаковское ш., 34*
*info@form.ru, gerasimenko@form.ru*

**Gerasimenko Yu. V.**
*FORM Co. Ltd*
*34 Ochakovskoe Ave., Moscow, 119530, Russia*
*info@form.ru, gerasimenko@form.ru*

Представлены результаты разработки конфигурируемого контрольно-испытательного оборудования для проведения электротермотренировки изделий ЭКБ, отмечены основные технические характеристики и функциональные возможности комплексов серии FORMULA BiS, в частности комплекса FORMULA BiS-2K.

**Ключевые слова:** электротермотренировка; комплексы ЭТТ; надежность; изделия ЭКБ.

Современный рынок электроники предъявляет высокие требования как к аппаратуре, так и к компонентам, из которых она изготавливается, при этом особое внимание уделяется их температурной стойкости и надежности. Производители ЭКБ должны постоянно улучшать характеристики своей продукции и обеспечивать требуемый уровень качества.

В условиях современного массового производства гарантией надежности изделий ЭКБ могут являться только непосредственные испытания продукции: функциональный контроль и параметрические измерения как в нормальных условиях, так и в диапазоне температур, испытания на различные типы воздействий, в том числе электротермотренировка (ЭТТ).

В целях обеспечения потребностей предприятий отрасли надлежащим оборудованием для проведения испытаний «ФОРМ» ведет разработку целого спектра гибко-конфигурируемого модульного контрольно-испытательного оборудования нового поколения для проведения электротермотренировки изделий ЭКБ широкой номенклатуры с измерением основных параметров электрических и температурных воздействий, регистрацией и документированием основных параметров режимов испытаний, обеспечивающего на долгосрочную перспективу потребности разработок отечественных дизайн-центров, серийного производства, входного контроля, а также сертификационных испытаний импортируемых изделий ЭКБ.

Повышенные требования к качеству и надежности ЭКБ обуславливают необходимость расширения функционала испытательного оборудования. ЭТТ изделий под электрической нагрузкой с контролем параметров по окончании процесса ЭТТ является уже недостаточным для гарантии качества выпускаемой продукции.

Поэтому особое внимание «ФОРМ» уделяет разработке комплексов, способных обеспечить выполнение *in situ* функционального контроля и измерений параметров изделий в процессе ЭТТ (при повышенной температуре и электрической нагрузке).

Особенностями разрабатываемых комплексов ЭТТ серии FORMULA BiS (далее — комплексов) являются модульный принцип их построения и гибкая конфигурируемость, позволяющие создавать контрольно-испытательное оборудование под задачи заказчика. В комплексах обеспечен высокий уровень автоматизации испытаний, идентификация и прослеживаемость режимов и результатов испытаний.

Количество камер в комплексе, их объем и количество испытательных плат определяют производительность комплексов. Система обеспечения электрических режимов конфигурируется под требуемую группу объектов контроля. В целях обеспечения возможности отбраковки потенциально ненадежных изделий непосредственно в процессе ЭТТ в комплекс может быть интегрирована контрольно-измерительная система (тестер). В настоящее время разработан комплекс FORMULA BiS-2K с интегрированным тестером FORMULA 2K.

Технические решения для FORMULA BiS-2K станут базисом для разработки в перспективе программно-аппаратных средств интеграции в комплексы ЭТТ контрольно-измерительных систем для высокочастотных ИМС (серия FORMULA HF) и полупроводниковых приборов (FORMULA TT3 и разрабатываемая система TXI с открытой архитектурой), тем самым существенно расширив номенклатуру испытываемых изделий ЭКБ.

УДК 543.275 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.599.601

# Молекулярные загрязнения неорганического происхождения в воздухе (ВМЗ) чистых производственных помещений (ЧПП). Разработка методик отбора и анализа проб с пределами обнаружения менее 10 ppt

## Molecular Contamination of Inorganic Origin in the Air (AMC) of Clean Industrial Premises. Development of Sampling and Analysis Methods for Samples with Detection Limits of Less than 10 ppt.

**Маркин А. В., Просий А. Д., Кимрова А. П., Глинский А. С., Тубольцева М. М.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*aglinskiy@niime.ru*

**Markin A. V., Prosiy A. D., Kimrova A. P., Glinskiy A. S., Tuboltseva M. M.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*aglinskiy@niime.ru*

Рассмотрен способ контроля путем применения методом захвата примесей неорганического происхождения из воздуха ЧПП с использованием системы жидкостных импинджеров, заполненных ДВ уровня E-1.2.ASTMD5127(18).Замеры ВМЗ в пробах проводились с использованием аттестованной методики измерения ДВ на ионном хроматографе (ИС) с пределом обнаружения 10 ppt.
**Ключевые слова:** ВМЗ (воздушно-молекулярные загрязнения); импинджер; ионные примеси; отбор проб воздуха.

The paper considers a method of capturing impurities of inorganic origin from the air of clean industrial premises using a system of liquid impinger filled with deionized water of level E-1.2.ASTMD5127(18) is considered. Measurements of the concentration of AMC in the obtained samples have been carried out using a certified method for measuring deionized water on an ion chromatograph with a low detection limit of 10 ppt.
**Keywords:** AMC (air molecular contamination); impinger; ionic impurities; air sampling.

С ростом требований к прецизионности технологических операций в микроэлектронике возросло влияние молекулярных загрязнений воздуха (ВМЗ) в ЧПП. Одним из примеров влияния ВМЗ является повышение содержания аммиака в воздухе, что проводит к искажению рисунка фоторезистивной маски в процессе фотолитографии [2]. Появилась необходимость анализировать концентрации ВМЗ в воздухе ЧПП.

Основа методики отбора проб воздуха на ВМЗ заключается в том, что примеси, находящиеся в отбираемой пробе воздуха, улавливаются раствором, которым заполнен сосуд (импинджер). Это осуществляется путем прокачки пробы воздуха через раствор с помощью насоса. В дальнейшем раствор анализируется на ИС в целях определения концентрации примесей [1].

В НИИМЭ разработана методика измерения содержания ионных примесей в ДВ с пределом обнаружения 10 ppt на ИС. На основании этого было принято решение в качестве ловушки использовать ДВ класса E-1,2ASTMD5127(18) и определять следующие примеси методом ИС: NH4+, Ca, F-, Cl-, NO3-, NO2-, Br-, SO42-, PO43-, K, Mg, Na, Li.

В процессе разработки методики определения ВМЗ исследовался вопрос оптимизации времени отбора пробы воздуха до наступления предела насыщения ДВ (эффективности поглощения). Проверены следующие времена отбора пробы: 15 мин, 30 мин, 1 час, 2 часа, 4 часа, 6 часов, 8 часов, с расходом 20 л/ч и последующим измерением на ИС. Во время отбора пробы фиксировались атмосферное давление и температура воздуха. Отбор проб проводили на участке фотолитографии. После отбора проба вводилась в ИС напрямую из сосуда импинджера.

Идентификация элементов осуществлялась по времени удерживания и соотнесения данного времени с графиком калибровки с последующим вычислением концентрации по площади сигнала элемента. Результаты с ИС пересчитывались на содержание в одном литре воздуха по формуле

$$C_{ppt_m} = \frac{C_1}{V}, \text{ pptm},$$

где V — объем воздуха, отобранного через импинджер, в литрах; $C_1$ — концентрация примеси с ИС (pptm).

Получена концентрация в pptm, но концентрации в газовой смеси измеряются в $ppb_v$, для пересчета необходимо допустить, что примеси в воздухе находятся в газовом состоянии, и тогда можно воспользоваться уравнением состояния идеального газа:

$$C_{ppv_v} = C_{ppt_m} \cdot \left( \frac{R \cdot T}{M \cdot P} \right),$$

где $R$ — газовая постоянная (8,31 Дж/(моль·К)); $M$ — молярная масса; $T$ — температура в кельвинах; $P$ — давление в Па, $C_{ppt}$ — концентрация в нг/л.

При анализе данных установлено, что наблюдается закономерность поведения ДВ в роли ловушки для примесей. Концентрация элементов в ДВ в начале отбора повышается, но с течением времени рост останавливается, и в дальнейшем увеличение концентрации примесей в ДВ не наблюдается при увеличении времени отбора пробы. Однако для элементов Na, K, Ca такая тенденция не наблюдается в выбранном диапазоне времени отбора.

***Выводы***

Исследование показало, что метод отбора проб воздуха для определения содержания неорганических примесей в ЧПП с использованием технологии жидкостного импинджера и анализом на ИС применим для контроля ВМЗ в ЧПП, в которых требуются определение и локализация источников загрязнения ВМЗ с низким уровнем примесей.

Данный метод обеспечивает предел обнаружения на уровне 10 pptm благодаря использованию ДВ в качестве ловушки и соблюдению жестких мер по сохранению чистоты ДВ при транспортировке.

Для элементов Na, K, Ca дополнительно необходимо провести исследование определения оптимального времени поглощения ДВ. Для остальных примесей время отбора пробы ограничено 2–4 часами.

***Литература***

1. ГОСТ Р ИСО 14644-8-2014 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 8. Классификация молекулярных загрязнений в воздухе. Введен 2015-12-01. — М.: Стандартинформ, 2014.
2. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Матюшкин И.В. Структурно-примесные комплексы в системе кремний — диоксид кремния // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2000. — № 3. — С. 39–47.
3. Shupp Aaron M., Rodier Dan and Rowley Steven. Monitoring airborne molecular contamination: a quantitative and qualitative comparison of real-time and grab-sampling techniques // Proc. SPIE 6518, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXI, 65183Z (5 April 2007).

УДК 543.67 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.602.603

# Реагентная вода для ультраследовых анализов на уровне предела обнаружения 1 ppt и менее

## Ultrapure Water for Ultratrace Analyses on 1 ppt or Less Detection Limits

**Васильева А. А., Глинский А. С., Леонтьева И. В., Просий А. Д.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*avasileva@niime.ru*

**Vasileva A. A., Glinskiy A. S., Leontyeva I. V., Prosyi A. D.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*avasileva@niime.ru*

Разработан подход, позволяющий обеспечивать проведение анализов деионизованной воды на ультраследовом уровне. Исследованы способы стабилизации и условия отбора проб сверхчистой деионизованной воды для последующей оценки примесей катионов на уровне предела обнаружения 1 ppt.
**Ключевые слова:** реагентная вода; ультраследовой анализ; предел обнаружения.

An approach has been developed to ensure the analysis of deionized water at ultratrace level. Methods of stabilization and condition of selecting a sample of the ultrapure deionized water have been investigated for subsequent assessment of cation impurities at 1 ppt level of detection limit.
**Keywords:** ultrapure water; ultratrace analysis; detection limit.

Современное производство микроэлектроники устанавливает высокий уровень требований к применяемым средам (химическим реактивам, газам, деионизованной воде) и, соответственно, к средствам их контроля. С развитием производства изделий микроэлектроники возникла необходимость контролировать параметры в химреактивах и деионизованной воде (ДВ) на уровне предела обнаружения в диапазоне 5 ppt [1].

Проведение анализов ДВ на ультраследовом уровне и обеспечение достоверности получаемых результатов сопряжены со сложностью контроля всего, с чем может соприкасаться анализируемая проба. Ключевыми факторами выступают:

1) условия окружающей среды во время проведения анализа в местах отбора и подготовки пробы, а также материалы, с которыми проба соприкасается;
2) качество ДВ и химических реактивов, применяемых в технологическом процессе при проведении пробоподготовки к анализу.

Необходимость строгого контроля параметров окружающей среды и материалов в местах контакта с пробой продиктована тем фактором, что деионизованная вода, характеризующаяся низким содержанием элементов, является идеальным растворителем. В связи с этим место отбора проб должно быть подготовлено не менее чем за 24 часа до отбора. Необходимо уделить особое внимание тому, чтобы в пробоотборнике максимально отсутствовала воздушная подушка, которая

является источником потенциального загрязнения. В качестве пробоотборника используют фторопласты с низкой степенью выщелачивания (HDPE, PFA). Благодаря реализации чистых помещений в лаборатории под постоянным контролем находится микроклимат, а проведение пробоподготовки и выполнение измерений на аналитическом оборудовании производятся в помещение с постоянным классом чистоты 3ИСО.

Особое внимание лаборатория уделяет ДВ, используемой в лаборатории. Для этого она имеет собственную установку доочистки воды с системой онлайн-мониторинга качества. Особенностью лабораторной установки является петля, которая исключает застой воды и вместе с этим размножение микроорганизмов [2]. Таким образом, удалось значительно улучшить качество применяемой воды по примесям катионов.

Ключевым моментом является контроль химических реактивов, применяемых при проведении анализов ДВ. Для проведения анализа на уровне предела обнаружения 5 ppt максимальное содержание примесей в реактиве не должно превышать 50 ppt. Для достижения предела обнаружения уровня 1 ppt и менее необходимо, чтобы химические реактивы, применяемые для стабилизации пробы, имели концентрацию примесей не более 10 ppt. Для получения таких реактивов используются установки доочистки, основанные на методе суббойлерной перегонки. Контроль возможных примесей катионов осуществляется посредством метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Выводы: соблюдение жестких требований к параметрам окружающей среды, материалам, с которыми контактирует анализируемая проба ДВ, а также использование химреактивов, в которых строго контролируется содержание примесей, позволили реализовать методику определения примесей катионов на уровне предела обнаружения 5 ppt. При этом рассмотрены только несколько факторов, оказывающих влияние на достоверность полученного результата измерений при проведении ультраследового анализа. Снижение предела обнаружения метода на одну единицу ppt требует от разработчика исследования единовременно целого спектра условий.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
2. Глинский А. С., Кузьмина Е. А., Просий А. Д., Кимрова А. П. Вода для ультраследовых лабораторных анализов // Материалы III Международной научно-технической конференции, 2019. — С. 147–151.

УДК 62-368 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.604.606

# Повышение точности подачи газов в технологическое оборудование с термокоррекцией внешней среды

## Improving Accuracy of Gas Supply to the Process Equipment with Temperature Correction of the External Environment

**Сажнев С. В., к. т. н., Князев В. И., к. ф.-м. н.**
*ООО «ЭЛТОЧПРИБОР»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр., 10*
*sazhnev@eltochpribor.ru, gas@eltochpribor.ru*

**Sazhnev S. V., Ph.D, Khyazev V. I., Ph.D**
*"ELTOCHPRIBOR" LLC*
*10 Panfilovsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460*
*sazhnev@eltochpribor.ru, gas@eltochpribor.ru*

Работа посвящена термокоррекции теплового регулятора массового расхода газа (РРГ) при подаче рабочего газа в технологическое оборудование. Определена связь температуры корпуса РРГ с дополнительной приведенной погрешностью регулирования РРГ по температуре и температурой внешней среды. На основе полученных в работе данных на базе аналогового РРГ создан цифровой РРГ с прецизионной точностью подачи рабочего газа в рабочий объем технологического оборудования в достаточно широком диапазоне температур внешней среды.
**Ключевые слова:** РРГ; регулятор массового расхода газа; температурная коррекция; приведенная погрешность регулирования расхода газа.

The work is devoted to thermal correction of the thermal mass flow controller (MFC) when the working gas is supplied to the vacuum reactor of technological equipment. The relationship of the MFC body temperature with the additional reduced temperature control error of MFC and the ambient temperature has been determined. Using the obtained data, based on analog MFC we have created digital MFC with precision accuracy flow of the working gas into the working volume of the process equipment in a rather wide range of ambient temperatures.
**Keywords:** MFC; gas mass flow controller; temperature correction; reduced error of gas flow control.

В современном промышленном оборудовании нашли широкое применение тепловые регуляторы массового расхода газа (РРГ) [1]. Отличительной особенностью данных приборов является высокая точность регулирования расхода газа. Однако с развитием промышленности требования к точности регулирования расхода газа возрастают [2].

Одним из определяющих факторов, влияющих на погрешность регулирования расхода газа РРГ, является температура внешней среды.

Основным элементом в конструкции РРГ, определяющим точность регулирования расхода газа, является датчик расхода газа, на котором главным образом и проявляется влияние температуры внешней среды на РРГ [3].

Целями данной работы является:

1) определение связи дополнительной приведенной погрешности регулирования РРГ с температурой корпуса РРГ и температурой внешней среды при неизменной температуре рабочего газа;

2) получение экспериментальных данных влияния температуры внешней среды на погрешность регулирования промышленного аналогового РРГ-10 «Элточприбор»;
3) изучение возможности применения МК с цифровой платой в РРГ-10 для уменьшения погрешности РРГ с помощью программной термокоррекции регулирования расхода газа.

На рис. 1–3 представлены экспериментальные данные по исследованию влияния температуры внешней среды на точность регулирования расхода газа РРГ.

На рис. 1 представлена корреляционная зависимость между изменением температуры окружающей среды.

На рис. 2 представлена основная приведенная погрешность того же РРГ-10, но с встроенной цифровой платой внутри в двух случаях: с выключенной программной температурной коррекцией расхода газа и с включенной. Как следует из рис. 3, программная термокоррекция РРГ значительно уменьшает основную приведенную погрешность РРГ. Это уменьшение составляет не менее чем 10 раз.

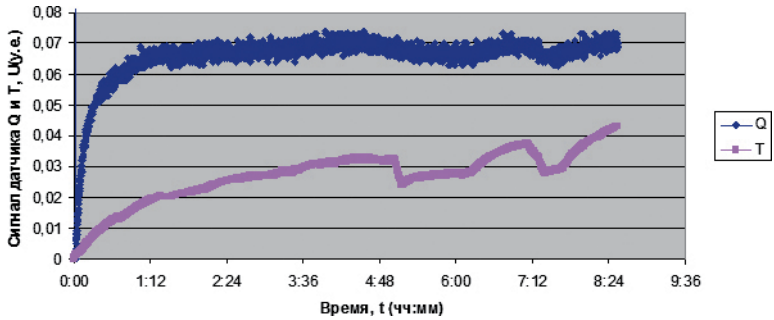



**Рис. 1.** Корреляционная связь между изменением температуры внешней среды T и величиной расхода газа Q аналогового РРГ

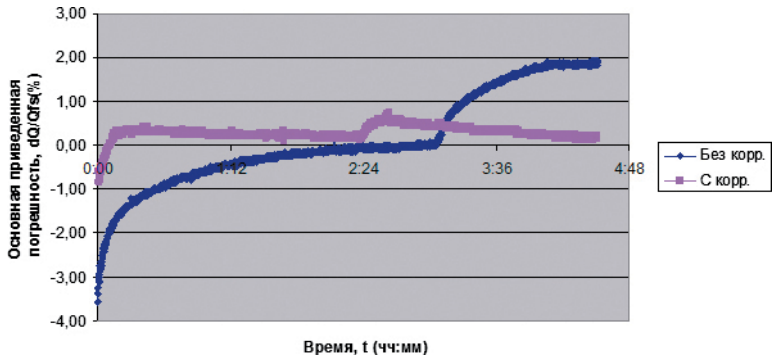



**Рис. 2.** Основная приведенная погрешность РРГ-10 с цифровой платой внутри РРГ с выключенной и включенной программной температурной коррекцией при нагреве термостата от комнатной температуры до температуры плюс 35 °C

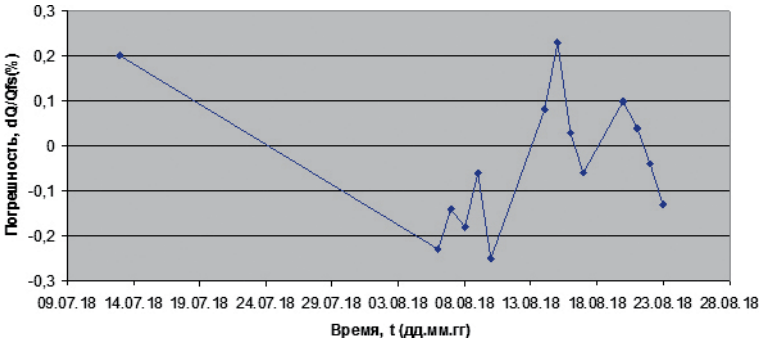



**Рис. 3.** Основная приведенная погрешность РРГ-10 с цифровой платой внутри в различные дни измерений после двухчасового прогрева при комнатной температуре с термокоррекцией

На рис. 3 представлена зависимость основной приведенной погрешности регулирования расхода газа РРГ-10 с встроенной цифровой платой от времени, характеризующая долговременную стабильность параметров РРГ. Время наблюдения составило более полутора месяца. За это время основная приведенная погрешность регулирования расхода газа не превысила 0,3 %.

***Выводы***

1. Определена связь основной приведенной погрешности регулирования теплового регулятора массового расхода газа «Элточприбор» РРГ-10 с температурой внешней среды.
2. Экспериментально показана возможность уменьшения основной приведенной погрешности аналогового РРГ-10 с помощью цифровой платы с термокоррекцией микроконтроллером внутри РРГ до величины 0,3 %.
3. По результатам работы был создан цифровой РРГ с температурной коррекцией регулирования расхода газа «Элточприбор» РРГ-20 для прецизионной подачи газа в технологическое оборудование.

***Литература***

1. Князев В. И., Сажнев С. В., Цветков Ю. Б. Создание и управление многокомпонентной газовой смесью в рабочем объеме вакуумного оборудования // «Gasworld Россия и СНГ», март–апрель 2019. — С. 16–18.
2. Berg Robert F., Green David S. and Mattingly George E. Semiconductor Measurement Technology: Workshop on Mass Flow Measurement and Control for the Semiconductor Industry // NIST Special Publication 400-101, February 2001.
3. Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезисторного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента, 2001. — № 1. — С. 54 — 60.

УДК 681.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.607.610

# Перспективы решения задач метрологического обеспечения разработки и испытаний изделий микроэлектроники на базе отечественных средств измерений и эталонов радиотехнических величин

## Prospects for Solving of the Problems of Metrological Provision for the Development and Testing of Microelectronic Products by Domestic Measuring Instruments and Standards

**Малай И. М., д. т. н.**
*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»*
*141570, Московская область, Солнечногорский район, г. п. Менделеево*
*malay@vniiftri.ru*

**Malay I. M., Ph.D**
*The Federal State Unitary Enterprise "Russian metrological institute of technical physics and radio engineering"*
*Mendeleevo, Moscow region, Russia, 141570*
*malay@vniiftri.ru*

Представлены результаты анализа измерительных задач, решаемых на этапах разработки изделий микроэлектроники, и потребностей предприятий в средствах измерений и эталонах радиотехнических величин. Изложены предложения по основным направлениям развития средств метрологического обеспечения измерений радиотехнических величин в процессе разработки и испытаний изделий микроэлектроники.
**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение; измерения на пластине; метрологическая прослеживаемость измерений.

The paper presents the results of the analysis of measurement problems, being solved at the stage of microelectronic products development, and production needs for measuring instruments and radio standards. Besides, it proposes the main directions for improvement of metrological provision means of radio measurements during microelectronic products development and testing.
**Keywords:** metrological provision; on-wafer measurements; metrological traceability.

С развитием микроэлектроники связаны революционные изменения практически во всех областях экономики. Изделия микроэлектроники входят в состав большинства промышленных образцов и в значительной степени определяют их характеристики и функциональные возможности.

Основными тенденциями развития современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются расширение функциональных возможностей, увеличение быстродействия цифровых устройств и расширение диапазона рабочих частот аналоговых устройств, снижение весогабаритных показателей и энергопотребления.

Создание современных изделий микроэлектроники невозможно без высокоточных измерений широкого спектра параметров, от геометрических размеров

до высокоточных измерений радиотехнических параметров на пластине. Данные измерения проводятся на всех этапах разработки и производства изделий микроэлектроники, точность таких измерений может быть обеспечена только за счет использования современных высокотехнологичных средств измерений (СИ), которые должны прослеживаться к соответствующим эталонам.

Характер и содержание решаемых измерительных по мере развития микроэлектроники и внедрения новых технологических стандартов претерпевают существенные изменения [1].

Начало активных работ отечественной промышленности в области разработки современных микроэлектронных устройств СВЧ-диапазона способствовало росту интереса к измерению параметров таких устройств. К наиболее важным измерительным задачам, решаемым в рамках данных работ, относятся измерения параметров согласования, коэффициента шума, коэффициента усиления, амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик устройств, а также связанные с ними измерения мощности и частоты электромагнитных колебаний, измерения комплексных коэффициентов отражения и передачи, спектральной плотности мощности шумов, уровня фазовых шумов. Для этого создан широкий спектр радиоизмерительных приборов.

Важной особенностью измерений параметров микроэлектронных устройств в СВЧ-диапазоне является необходимость использования специальной оснастки для подключения испытываемых устройств к измерительным приборам. При этом остро стоит задача обеспечения возможности контроля параметров микроэлектронных устройств на пластине (подложке).

В свою очередь, использование вспомогательного оборудования обуславливает необходимость разработки и аттестации соответствующих методик измерений, при этом гарантией получения достоверных данных в процессе тестирования микроэлектронных устройств является наличие необходимых средств измерений.

ФГУП «ВНИИФТРИ» проведен опрос среди сотрудников приборостроительных предприятий и организаций о существующих потребностях в эталонах и средствах измерений радиотехнических и радиоэлектронных величин, позволивший выявить наиболее востребованные средства измерений, к которым следует отнести генераторы сигналов, осциллографы, измерители и калибраторы мощности, анализаторы спектра, частотомеры, анализаторы цепей и векторные генераторы.

Всего было обработано более 700 поступивших от предприятий заявок на приборы. Распределение обращений по группам СИ, полученное в результате анализа, представлено на рис. 1.

В 82 % случаев для удовлетворения потребностей в средствах измерений предприятиями рассматриваются приборы иностранного производства.

Анализ потребности предприятий промышленности в радиоэлектронных СИ и номенклатуры выпускаемых отечественных средств измерений свидетельствует о дисбалансе между потребностями в закупке и возможностями отечественных предприятий — производителей измерительной техники.

Отечественными СИ закрывается диапазон лишь до 40 ГГц. Однако производство СИ радиотехнических величин в нашей стране по многим группам приборов вряд ли можно считать серийным: сроки поставки порой достигают шести месяцев и более.

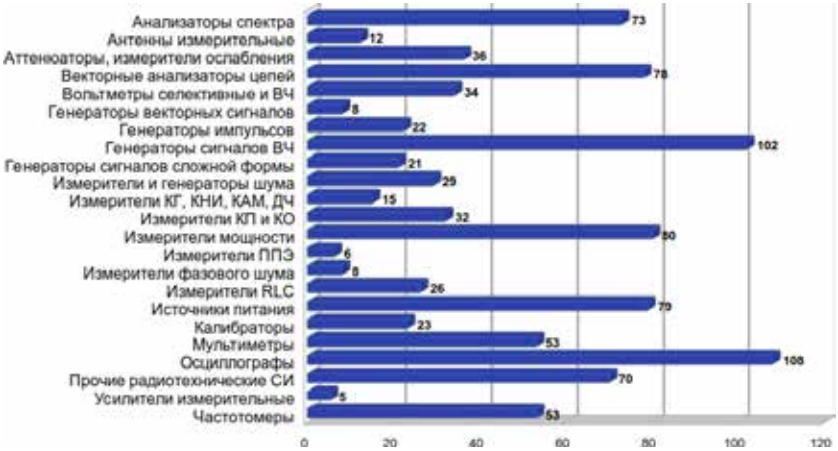



**Рис. 1.** Распределение обращений по группам средств измерений

Основные причины отставания отечественных СИ радиотехнических величин от уровня лидеров мирового приборостроения заключаются в отсутствии на данный момент единой комплексной долгосрочной технической политики в области создания средств измерительной техники и измерительных технологий.

Также следует отметить отсутствие специализированной отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) и материалов для создания современных средств измерений, что формирует критическую зависимость по отдельным видам измерений от возможности использования иностранной ЭКБ и технологий.

Ситуация усугубляется ограничениями использования импортной ЭКБ, введенными отечественными регуляторами, и запретом ряда государств на поставку в Россию высокотехнологичной ЭКБ.

В сложившейся ситуации представляется крайне сложным создание высокотехнологичных отечественных эталонов и средств измерений только на рыночных условиях без целевого государственного финансирования. Примером государственной поддержки развития микроэлектроники за рубежом является реализация разработанной Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) новой программы в области полупроводниковых приборов [2].

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработан проект программы «Развитие отечественной эталонной базы и парка средств измерений радиотехнических радиоэлектронных величин на период до 2030 года». Программа направлена на обеспечение отечественной промышленности современными средствами измерений и достижение технологической независимости в области разработки и производства средств измерительной техники. При подготовке проекта программы учитывались положения ПП-8 — программы развития микроэлектроники, подготовленной Департаментом радиоэлектронной промышленности Минпромторга России.

Средства измерений для СВЧ-диапазона широко используются как сфере обороны и безопасности, так и в различных областях связи и телекоммуникаций,

и поэтому развитие отечественного приборостроения может стать мощным драйвером развития электроники в России.

***Литература***

1. Макушин М., Мартынов В. Некоторые проблемы современной метрологии в микроэлектронике // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес, 2020. — № 2. — С. 80–91.
2. Макушин М. Битва за будущее микроэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес, 2021. — № 2. — С. 114–126.

***References***

1. Makushin M., Martynov V. Electronics: Sience, Technology, Business, 2020. № 2. P. 80–91. (In Russian).
2. Makushin M. Electronics: Sience, Technology, Business, 2021. № 2. P. 114–126. (In Russian).

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.611.612

# Зондовые измерения: от пластины до атома

## Probe Measurements: from a Plate to an Atom

**Денисова Е. А.**
*ООО «Остек-Электро»*
*121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2*
*Denisova.E@ostec-group.ru*

**Denisova Ye. A.**
*Ostec-Electro Ltd*
*5/2 Moldavskaya St., Moscow, 121467, Russia*
*Denisova.E@ostec-group.ru*

Показаны области использования зондовых измерений, указаны некоторые особенности обеспечения электрического контакта с помощью зондов и сложности, возникающие при решении различных задач измерения электрических характеристик.
**Ключевые слова:** полупроводники; микроэлектроника; зондовые измерения; микроманипуляторы.

Во многих областях науки и техники приходится сталкиваться с подачей и измерением электрических сигналов на исследуемых образцах. Возникает множество ситуаций, когда необходимо осуществить электрический контакт к образцам, не имеющим специальных выводов, к которым относятся изделия микроэлектроники до установки в корпус, отдельные микро- и нанообъекты и многие другие. В таких случаях для обеспечения надежного электрического контакта прибегают к зондовым измерениям.

Сферой, где наиболее широко используются зондовые измерения, является микроэлектроника. Так, для контроля промежуточных этапов производства и тестирования готовых элементов на пластинах используются ручные и автоматические зондовые станции. Для обеспечения стабильности параметров контакта применяются различные способы виброзащиты. Также особые требования могут предъявляться к системам автоматического позиционирования, поскольку размер контактной площадки может не превышать 50 мкм.

Зондовые измерения также применяются при контроле характеристик исходных полупроводниковых пластин и выращиваемых на них слоев. При измерении таких образцов не так важна точность позиционирования зондов, как обеспечение хорошего омического контакта. Специально с этой целью разработано множество вариантов зондовых игл, которые подбираются исходя из задачи.

Наиболее интересно использование зондовых измерений в лабораторных исследованиях. Так, зондовые измерения повсеместно применяются при измерениях тестовых образцов на этапе разработки, при исследовании готового изделия, при выявлении причин брака, в научных лабораториях при исследовании новых материалов и образцов в различных условиях окружающей среды. Такие задачи часто требуют очень точного позиционирования. При оценке дефектов и разработке нового изделия часто требуется контактироваться к дорожкам разводки, ширина которых не превышает одного микрометра. В настоящее время для упрощения

процесса контактирования к структурам малой размерности и ускорения процессов разработки начинают применяться роботизированные манипуляторы, управляемые вручную оператором. При механическом контакте измерительных зондов с образцом на последнем могут оставаться следы и царапины. Роботизированные манипуляторы также частично позволяют решить данную проблему за счет точного воспроизведения силы и высоты контакта, чего невозможно достичь при даже самом аккуратном и тренированном ручном подводе.

Достаточно часто возникает необходимость проведения измерений в специфических условиях окружающей среды. В таких случаях образец помещается в камеру с контролируемой средой. Разработаны различные варианты обеспечения электрического контакта к образцу в таких камерах. Манипуляторы могут располагаться внутри камеры и настраиваться заранее, оставаясь в одном положении в течение всего эксперимента. Также они могут управляться снаружи камеры посредством механических передач и гермовводов. Роботизированные манипуляторы требуют только электрических гермовводов как для передачи снимаемого сигнала, так и для управления самим позиционером.

Благодаря зондовым измерениям выполнима задача исследования электрических и механических характеристик отдельных нанообъектов, таких как нанотрубки, отдельные молекулы. В решении данных задач используются не только особые манипуляторы с разрешением в единицы нанометров, но и специальные иглы с радиусом острия не более десятка нанометров. Также позиционеры приходится размещать в камере электронного микроскопа либо на платформе сканирующего зондового микроскопа, что накладывает ряд ограничений. Роботизированные манипуляторы наименее подвержены таким ограничениям и наиболее точны за счет использования пьезоэлементов. Такие манипуляторы позволяют перемещать отдельные атомы и измерять их характеристики. Так, одной из первых в данном направлении является широко известная работа сотрудников IBM, в ходе которой посредством иглы зондового микроскопа логотип компании был составлен из атомов ксенона.

УДК 621.3.082.62 + 681.2.089 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.613.614

# Измерение электрических характеристик при внешнем воздействии. Есть ли смысл в метрологии?

## Measuring Electrical Characteristics with Temperature Testing. Does Metrology Make Sense?

**Шейхо А. С.**
*ООО «Остек-Электро»*
*121467, Москва, ул. Молдавская, д. 5, стр. 2*
*Anton.Sheykho@ostec-group.ru*

**Sheykho A. S.**
*Ostec-Electro Ltd.*
*5/2 Moldavskaya St., Moscow, 121467, Russia*

В статье рассмотрены основные методы измерений электрических характеристик ЭКБ под воздействием тепла и холода. Оценены преимущества и недостатки испытаний в климатических камерах и при помощи систем с нагнетанием воздуха. Предложен новый метод воспроизведения температуры на базе новых установок.
**Ключевые слова:** температурные испытания; микроэлектроника; автоматизация измерений; метрология; электрические измерения.

В настоящее время измерение электрических характеристик ЭКБ под воздействием температуры проводится в климатических камерах или системах с нагнетанием воздуха (temperature forcing systems), также называемых термостримами. Каждый из стандартных способов воспроизведения температуры обладает недостатками. В первую очередь недостатки связаны с паразитными связями оснастки, конструктив которой продиктован самим способом передачи тепла/холода. Другой важной проблемой является то, что измерительные системы нормированы на выходе собственных соединителей, что вкупе с паразитными связями оснастки и температурным воздействием на вспомогательные компоненты на загрузочной плате негативно влияет на точность и достоверность измерений.

Для повышения достоверности измерений была разработана вакуумная термоэлектрическая платформа, в которой применяется иной метод воспроизведения температуры. Разработанный метод позволяет создавать температурное воздействие на электронный компонент в широком диапазоне температур — от −65 °C до 180 °C, и обладает рядом ключевых преимуществ по сравнению со стандартными способами:

- не используются дополнительные хладагенты;
- передача температуры происходит в сам компонент, что снижает влияние температуры на вспомогательные компоненты, установленные на плате с контактирующим устройством, измерительные каналы;
- возможность выхода на максимальную отрицательную температуру за время, не превышающее 7 минут;
- нет необходимости укладки теплоизолирующих материалов для исключения влияния воздушного потока на загрузочную плату (проблема

обледенения внутренней стороны загрузочной платы при использовании систем типа «термострим»);

- при измерениях в диапазоне отрицательных температур производится откачка внутреннего объема рабочей зоны, что позволяет избежать выпадения инея на контактах компонента.

Представлены особенности установки «ДЕТЕРМИНАЛ», построенной на новой вакуумной термоэлектрической платформе. Рассмотрены метрологические особенности контроля температуры, электрических параметров и способов снижения влияния электромагнитных помех при проведении измерений с высокой точностью.

УДК 621.317 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.615.618

# Особенности готовых программно-аппаратных решений для тестирования параметров МИС. Путь к разработке автоматизированного измерительного комплекса реального времени

## Specifics of Finished Hardware-software Solutions for Testing MMIC Parameters. A Way to Developing a Real Time Automated Measuring System

**Сметанин В. В.**
*ООО «НПП «ПРИМА»*
*603950, г. Нижний Новгород, Сормовское ш., 1Ж*
*smetanin-vv@prima.nnov.ru*

**Smetanin V. V.**
*PRIMA RPE LLC*
*1ZH Sormovskoe Ave., Nizhnij Novgorod, 603950*
*smetanin-vv@prima.nnov.ru*

Дана оценка возможности создания автоматизированного измерительного комплекса для тестирования параметров СВЧ МИС на базе программно-аппаратных решений от ведущих производителей измерительного оборудования. Предложен проект разработки собственного автоматизированного измерительного комплекса с отличительными признаками системы реального времени.
**Ключевые слова:** зондовые СВЧ-измерения; автоматизация измерений; монолитная интегральная схема; программное обеспечение; автоматизированные измерительные комплексы.

The article evaluates the possibility of creating an automated measuring system for testing microwave MIC parameters based on hardware-software solutions from leading measuring equipment manufacturers. The project of developing a proprietary automated measuring system with real time features has been provided.
**Keywords:** microwave probe measurements; measurement automation; microwave monolithic integrated circuit; software; automated measuring system.

Качественная разработка СВЧ МИС связана с широтой возможностей по анализу параметров устройств на всех этапах жизненного цикла продукции: на этапе проектирования, квалификационных испытаний и на этапе серийного производства.

На данный момент актуальной задачей является поиск комплексного решения для выполнения полного цикла измерений параметров СВЧ МИС на зондовой станции. Калибровка, навигация видеосистемы зондовой станции по пластине, создание последовательностей установки напряжений питания измеряемых устройств и начальная конфигурация состояния приборов, входящих в состав тестовой установки, реализуются в различных программных продуктах без строгой структуры и синхронизации.

Анализ исследований отечественных компаний в рамках работ по автоматизации СВЧ-измерений позволяет определить текущий прогресс в данной области. Положительный результат достигнут в построении алгоритмов и разработке программного обеспечения для автоматизации процессов измерений вольт-амперных характеристик и параметров рассеяния СВЧ-транзисторов на полупроводниковой пластине [1]. Существуют решения для автоматического тестирования параметров готовых приемо-передающих модулей на базе СВЧ МИС [2]. Для выполнения задач по полной характеризации параметров большой партии СВЧ МИС на зондовой станции данные исследования полезны, но недостаточны, так как предназначены для измерений элементной базы на неразрезанной полупроводниковой пластине или готовых приемо-передающих модулей.

Ведущие производители измерительного оборудования предлагают широкий спектр специализированных аппаратных средств, которые интегрируются с программным обеспечением для автоматизации процесса тестирования. Доступны как простые приложения, использующие для управления приборами стандартные команды протокола SCPI, так и программные платформы автоматизации измерений. Программные платформы обеспечивают управление несколькими измерительными инструментами одновременно без необходимости программирования и создание автоматических тестовых последовательностей с помощью интуитивно понятного графического интерфейса. Преимуществом готовых программных решений является интеграция приложений с аппаратной частью и адаптация к исполнению прямых функциональных задач измерительных устройств. Однако стандартные программные решения работают по различным принципам и алгоритмам с разными устройствами и форматами данных, имеют особенности функционирования, что может являться препятствием при построении на их базе автоматизированного измерительного комплекса тестирования параметров СВЧ МИС.

Предложен вариант проекта автоматизированного измерительного комплекса тестирования параметров МИС СВЧ с признаками измерительной системы реального времени. Комплекс является интеграцией стандартных аппаратных средств (зондовая станция, векторный анализатор цепей, источники-измерители питания, ВЧ-генераторы) и программной архитектуры, которая разрабатывается с учетом особенностей измерения полного набора характеристик СВЧ МИС.

Автоматизированный измерительный комплекс тестирования характеристик СВЧ МИС как сложная аппаратно-программная система реального времени должен успешно решать задачи нескольких уровней. Следует отметить базовые уровни:

- на *пользовательском* уровне важным элементом комплекса должен являться диалог оператора с управляющим персональным компьютером, также реализуется процесс отображения, сохранения и статистической обработки результатов измерений микросхем, оператор избавляется от процесса ручного форматирования «сырых» данных с измерительных устройств в готовый результат;
- на *иерархическом* уровне определяется архитектура системы, выделяются главный и зависимые приборы, ведущий прибор связывает работу инструментов автоматизированного комплекса, разрешается функционирование различных объектов системы по запросу;
- на уровне *планирования и приоритетов* реализуется временная синхронизация работы различных устройств с возможностью последовательного

и параллельного выполнения процессов, работа с прерываниями, включение и выключение по сигналу с головного устройства, цель — устранение временных коллизий, отсутствие перегруза данных;

- на *транспортном уровне* решаются задачи распределения потоков информации и управляющих команд с точки зрения приоритета и назначения по различным физическим интерфейсам комплекса;
- уровень *безопасности* отвечает за предупреждение возникающих ошибок в автоматизированном процессе измерений, обеспечивает права доступа к объектам управления системой и кодирование информации для защиты данных с результатами автоматизированных тестов.

***Литература***

1. Сальников А. С., Добуш И. М., Кошевой С. Е., Шеерман Ф. И. Автоматизация зондовых измерений параметров рассеяния и вольт-амперных характеристик транзисторов с использованием программной среды Indesys-MS // Доклады ТУСУРа, 2010. — № 2 (22). — С. 140–143.
2. Кривов А., Небогин А. Автоматизированные системы тестирования приемопередающих модулей — решения компании «Радиолайн» // Электроника НТБ, 2015. — № 9 (00149). — С. 142–150.

Qualitative development of a microwave MIC is related to the range of possibilities for analyzing units' parameters at all stages of the product lifecycle: at the stage of designing, qualification testing and full-scale production as well.

Currently a vital task is to find a comprehensive solution for performing the microwave MIC parameters full cycle measurements using the probe station. Calibration, probe station video system navigation across the wafer, creation of voltage setting sequences for the units under measurements, initial condition configuration of the units constituting the testing system are implemented in various software products lacking strict structure and synchronization.

The analysis of domestic companies' researches within the framework of works related to microwave measurements automation allows determining the current progress in the area. Positive result is achieved in algorithm and software development for automating processes of measuring volt-ampere characteristics and S-parameters of microwave transistors in the semiconductor wafer [1]. There are solutions for automatic testing of parameters of finished transceiver modules based on microwave MIC [2]. The research data are useful for complete characterization of parameters of a microwave MIC large lot in the probe station, but are not sufficient as intended for measuring the element base in the uncut semiconductor wafer or finished transceiver modules.

Leading measurement equipment manufacturers provide a wide range of dedicated hardware, integrated with the software intended for testing process automation. Both simple applications using SCPI protocol standard instructions to control the units, and measurements automation software platforms are available. The software platforms are able to control several measuring units at a time without programming and creating automatic testing sequences by using intuitive user-friendly graphic interface. The finished software solutions advantage is integration of applications with hardware and adaptation to executing direct functional tasks of measuring units. However, standard software solutions work based on different principles and algorithms with different units and data formats, feature functional

peculiarities that can be a barrier for building an automated measuring system for testing microwave MIC parameters on their basis.

Herein a project variant has been proposed for automated measuring system of microwave MIC parameters testing with real-time measuring system features. The system is an integration of standard hardware (probe station, vector network analyzer, power measuring and supply units, HF-generators) and software architecture, developed with regard to microwave MIC full set of characteristics measuring specifics.

The automated measuring system for testing microwave MIC characteristics, being a complicated real time hardware-software complex, shall successfully solve tasks of several levels. The basic levels are as follows:

- at *user* level the system shall provide such an important element as the dialog of an operator with the control personal computer, besides the process of displaying, storing and statistic processing of the microcircuits' measuring results shall be implemented, the operator is relieved from the process of manual formatting "raw" data from measuring devices into finished result;
- at *hierarchical* level the system architecture is defined, master and slave units are determined, the master unit interconnects the automated system instruments' operations, the system various elements functioning is allowed by request;
- at *planning and priorities* level the time synchronization of various units operation with the possibility of serial and parallel process performance is implemented, as well as operation with interrupts, switching on/off by master unit instruction, purpose — elimination of time collisions, absence of data overload;
- at *transport* level tasks of information flows and control instructions separation are solved from the point of view of priority and assignment among the system different physical interfaces;
- *security* level is in charge of preventing errors emerging during the automated measuring process, ensures rights of access to the system control units and information coding to protect data with automated testing results.

***References***

1. Salnikov A. S., Dobush I. M., Koshevoi S. E., Sheerman F. I. Avtomatizatsiya zondovykh izmerenii parametrov rasseyaniya i voltampernykh kharakteristik tranzistorov s ispolzovaniem programmnoi sredy Indesys-MS. Doklady TUSURa, 2010, № 2 (22) 140–143.
2. Krivov A., Nebogin A. Avtomatizirovannye sistemy testirovaniya priemoperedayushchikh modulei. Resheniya kompanii «Radiolain». Elektronika NTB, 2015, № 9 (00149), 142–150.

УДК 621.3.049.7 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.619.621

# Сортировка кристаллов с применением автоматических монтажных платформ AMADYNE GmbH

## Die Sorting on Universal Automatic Die Bonding AMADYNE GmbH Platforms

**Богословский В.А.**
***коммерческий директор***
*ООО «Евроинтех»*
*140011, г. Люберцы, ул. Юбилейная, 26, пом. 016*
*bog@eurointech.ru*

**Bogoslovskiy V.A.**
***CCO***
*Eurointech Ltd.*
*Office 016, 26 Yubileinaya St., Lyubertsy, 140011, Russia*
*bog@eurointech.ru*

Возможность использования функции сортировки кристаллов как опции в составе сборочно-монтажного комплекса или отдельной единицы оборудования. Обзор функционала сборочных платформ AMADYNE GmbH, типовое решение на базе установки CAT$^{ap}$.

**Ключевые слова:** сортировка кристаллов; сборка; монтаж кристаллов; гибридная микросборка; производство ЭКБ.

Сортировка кристаллов с разделенной пластины представляет собой один из важных этапов сборки ЭКБ или гибридных микросборок. В отличие от монтажа с пластины в собираемое изделие, позволяет значительно повысить производительность за счет загрузки различных типов кристаллов в оборудование, не имеющее систем подачи кристалла с пластины. Также кристаллы в таре значительно проще хранить и транспортировать.

Сортировка, это процесс, имеющий множество вариантов реализации, на которые необходимо обратить внимание при разработке требуемого решения.

В зависимости от типа кристалла процесс может быть оптимизирован как для достижения максимальной производительности — для кристаллов с толщиной не менее 150 мкм без чувствительных структур на «лице», так и для обеспечения безопасного подъема, захвата и размещения в тару — для кристаллов с толщиной менее 100 мкм, кристаллов с чувствительными структурами и МИС с воздушными мостами и сенсоров (рис. 1).

Очень популярным решением, обусловленным экономическими факторами и оптимизацией занимаемого оборудованием пространства, является интеграция опции сортировки кристаллов в установку монтажа кристаллов. Подобный подход предполагает, что установка будет оборудована системой для выталкивания кристалла с липкого носителя, программное обеспечение позволит осуществлять экспорт карт годности или обеспечивать распознавание маркировки на кристалле. Какое-то время в процессе использования установка будет выполнять функции

сортировщика, а какое-то — операции монтажа кристаллов, в том числе и с пластины на липком носителе.

Но, как показала практика, данный подход имеет ряд своих недостатков. Основным из них является время работы установки для выполнения процесса сортировки кристаллов: современные пластины диаметром более 150 мм могут содержать в себе десятки тысяч кристаллов. Так, например, пластина диаметром 200 мм содержит более 30000 кристаллов 1×1 мм. При средней скорости одного цикла pick&place с применением двух процессов распознавания в 7 с разбор пластины диаметром 200 мм занимает ~60 часов. Соответственно, все это время установку нельзя использовать в основном качестве — для сборки.

Более эффективным решением является использование двух раздельных единиц оборудования для сортировки и монтажа независимо друг от друга. Такой подход обеспечивает большую гибкость производства различных типов ЭКБ при подаче необходимой номенклатуры кристаллов из различной тары в отличие от пластины, обычно содержащей только один тип кристаллов. [1]

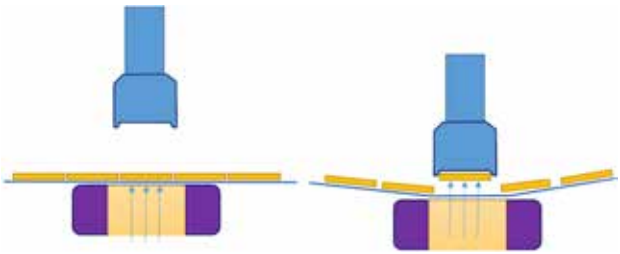


**Рис. 1.** Схема подбора кристалла инструментом типа «пирамида»

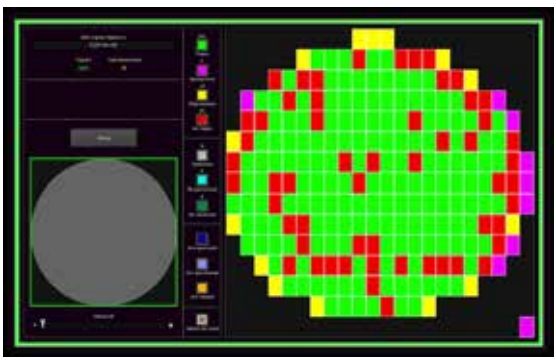


**Рис. 2.** Окно «карта годности» в ПО установки CAT$^{ap}$ AMADYNE GmbH

Системы сортировки кристаллов на базе платформ производства компании AMADYNE GmbH моделей fab1, CAT$^{ap}$ (рис. 3) и EMU обладают всеми функциями монтажных установок — система технического зрения и инспекции состояния

кристалла, оригинальная система выталкивания для подбора хрупких кристаллов и автоматическая смена инструмента, а также возможность импортирования карт годности формата SEMI G81-1000 (рис. 2) или конвертации из основных форматов, получаемых из систем анализа электрических параметров [2].

**Рис. 3.** Автоматическая платформа AMADYNE CAT$^{ap}$ в конфигурации «сортировщик»

***Литература***

1. Богословский В., Борисова Ю. МИКРОСБОРКА — Сортировка кристаллов, 2020. http://eurointech.ru.
2. Bucher C., Reith T. Products and application, 2019. https://web.amadyne.net.

УДК 621.317.791 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.622.623

# Новое поколение российских тестеров микросхем на основе открытого стандарта AXIe

## New Generation of the Russian chip Testers Based on the Axle Open Standard

**Зайченко С. Н., к. т. н., Шелевер Д. В., Климовских А. В.**
*ООО «VXI-Системы»*
*124482, г. Москва, г. Зеленоград, Савелкинский проезд, 4*

**Zaychenko S. N., Ph.D, Shelever D. V., Klimovskikh A. V.**
*"VXI-Systems" LLC*
*4 Savelkinsky Lane, Zelenograd, Moscow, 124482*

Впервые в Российской Федерации на основе открытого стандарта AXIe разработаны прототипы тестеров микросхем, СБИС, процессоров, ПЛИС различного типа — MST-14 и DST-128. Приведены основные технические характеристики тестеров и их краткое описание. Дано краткое описание текущих реализованных проектов с применением прототипов тестеров MST-14 и DST-128.
**Ключевые слова:** тестер микросхем; тестер СБИС; тестирование процессоров; тестирование ПЛИС; AXIe-1.

При создании и серийном производстве современных СБИС, процессоров, ПЛИС различного типа и других современных микросхем требуются специализированные системы, позволяющие тестировать функционал и качество изготовления микросхем. Впервые в Российской Федерации специалистами компании ООО «VXI-Системы» были построены прототипы тестеров микросхем MST-14 и DST-128 на основе открытого стандарта AXIe. В 2018 году в Российской Федерации был разработан ГОСТ 52286-2018 «Архитектура базовая построения систем контрольно-измерительной аппаратуры AXIe-1». Разработка данного ГОСТ полностью узаконила стандарт в РФ. Благодаря тому что все системные составляющие стандарта AXIe (шасси, контроллеры и др.) разработаны и серийно производятся в Российской Федерации, удалось соединить в одном техническом решении полную независимость от иностранных производителей и передовые технические решения.

*Основные технические характеристики прототипа тестера MST-14:*

- открытый международный стандарт AXIe;
- единая конструкция (один крейт на 14 слотов);
- 1408 цифровых каналов;
- 96 каналов источников питания.

**Основа тестера — модуль P128C200M.**

*Технические характеристики модуля P128C200M:*

- 128 цифровых каналов, частота 250 МГц/канал;
- память 128 млн векторов на канал;
- PPMU на каждый канал, интерфейс PCIe Gen2.

В модуле P128C200M применяется самая современная элементная база с высоким быстродействием и сниженным тепловыделением, что позволяет разместить в тестере до 1408 каналов и обеспечить его работу при воздушном охлаждении.

Одна из ключевых особенностей тестера MST14 — принципиально новое прижимное устройство; устройство подобного рода впервые реализовано в Российской Федерации.

*Технические характеристики прижимного устройства:*

- до 1760 контактов по 2 ГГц,
- 4 Гб/сек,
- 64 канала до 20 ГГц для СВЧ-приложений,
- электропривод, обеспечивающий высокое качество контактирования и исключение ручных операций.

Возможности прижимного устройства существенно превосходят возможности прототипа MST-14 и рассчитаны на дальнейшее расширение возможностей тестера при применении новых модулей следующих модификаций. Совместно с компанией Keysight были проведены испытания по интеграции аналоговых AXIe-модулей Keysight в тестере MST-14. Испытания были завершены с успехом: модули Keysight отлично работают в составе тестера. При необходимости в MST-14 можно встроить тестер магистрали PCIe, тестер DDR-памяти от Keysight, которые выполнены в виде AXIe-модулей. Проведенные испытания подтвердили возможность применения технологии тестера-конструктора, когда потребитель может участвовать в построении необходимого ему тестера при подборе состава исполнительных модулей.

***Текущие реализованные проекты***

На прототипе тестера MST-14 была создана измерительная оснастка и подготовлено программное обеспечение для тестирования процессора 1879ВМ8Я разработки и изготовления НТЦ «Модуль». Время загрузки векторов составило 5 минут, время тестирования процессора — 3 минуты, что является высоким результатом. Также была создана недорогая настольная мини-версия тестера DST-128 на 128 цифровых каналов (используется тот же модуль P128C200M) с упрощенным подключающим устройством, служащая для микросхем среднего класса. Фактически в прототипе тестера MST-14 закладываются основы технологии тестирования микросхем на основе унифицированных решений в стандарте AXIe, допуская расширение его возможностей за счет использования импортных приборов в стандарте AXIe. Планируется дальнейшее расширение возможностей тестера MST-14 путем интеграции в него аналоговых модулей, заказных модулей, протокольных модулей, разработанных как компанией ООО «VXI-Системы», так и другими производителями.

***Литература***

1. ГОСТ 52286-2018. Архитектура базовая построения систем контрольно-измерительной аппаратуры AXIe-1. Технические требования — Введ. 2019-05-01. — Москва: Стандартинформ, 2018.
2. AXIe Consortium: сайт. — 2010. URL: http://www.axiestandard.org (дата обращения: 01.07.2021).

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.624.625

# Применение многоканальной системы инспекции для контроля чистых пластин, используемых в устройствах силовой электроники

## Applying a Multichannel Inspection System to Control Pure Plates Used in Power Electronics Devices

**Минин М. Г., Шафоростов А. А., к. т. н.**
*ООО «Группа Ай-Эм-Си»*
*117638, г. Москва, ул. Криворожская, 23, корп. 3*
*sales@imc-systems.ru*

**Minin M. G., Shaforostov A. A., Ph.D**
*IMC Group Ltd*
*23/3 Krivorozhskaya St., Moscow, 117638*
*sales@imc-systems.ru*

Многоканальная система автоматизированной инспекции KLA Candela 8520 позволяет существенно повысить эффективность определения дефектов поверхности чистых пластин в ходе пооперационного контроля. Запатентованная оптическая технология, позволяющая одновременно измерять интенсивность рассеяния при изменяющихся углах падения, изменения топографии, коэффициент отражения поверхности, фазовый сдвиг волны и фотолюминесцентный отклик, дает возможность анализировать 100 % поверхности пластины за несколько минут.

**Ключевые слова:** инспекция дефектов поверхности; эпитаксиальные дефекты; профилометрия поверхности; фотолюминесценция.

Внедрение автоматизированного контроля пластин и технологии статистического контроля производственных процессов (SPC) позволяет значительно сократить потери в выходе продукции, вызванные дефектами в эпитаксиальном слое, свести к минимуму отклонение реактора для химического осаждения из паров металлоорганических соединений (MOCVD) от номинальных параметров.

KLA Candela 8520 — система второго поколения для контроля поверхности и измерения фотолюминесценции, предназначенная для повышения эффективности определения характеристик дефектов в подложке и эпитаксиальном слое. Предшественником системы Candela 8520 является Candela CS920, которая была первым в своем роде устройством, позволяющим обнаруживать как макродефекты, так и микродефекты на поверхности и в кристаллической решетке. В ней используется запатентованная оптическая технология, позволяющая одновременно измерять интенсивность рассеяния при изменяющихся углах падения, изменения топографии, коэффициент отражения поверхности, фазовый сдвиг волны и фотолюминесценцию в целях автоматического определения и классификации разнообразных дефектов (DOI).

Использование нескольких каналов обнаружения в системе 8520 позволяет быстрее выявлять проблемы, связанные с технологическим процессом, и обнаруживать дефекты, влияющие на объем выпуска. Данный метод контроля позволяет

проанализировать всю поверхность за несколько минут, получить изображения с высоким разрешением, построить карты дефектов для пластин и автоматически классифицировать дефекты. Система контроля Candela 8520 позволяет сохранять необработанные данные, полученные от нескольких детекторов. Характерные признаки дефектов, обнаруживаемые при помощи разных детекторов, могут различаться в зависимости от типа дефекта. Подобный подход помогает технологам точно классифицировать дефекты. Система Candela 8520 позволяет обнаруживать и классифицировать как макро-, так и микродефекты.

Классификация микродефектов выполняется на основании сравнения характерных оптических признаков, обнаруживаемых при попадании луча под прямым и острым углом к поверхности. Процессы, протекающие во время химического осаждения из паров металлоорганических соединений (MOCVD), являются причиной множества дефектов, возникающих во время эпитаксиального роста на разных материалах подложки (SiC, GaN и т.д.). Система Candela 8520 обладает высокой чувствительностью к общим дефектам, влияющим на объем выпуска, включая микропоры, трещины, шестиугольные поры, капли, дефекты серповидной формы, царапины и другие топографические дефекты. Точная классификация играет важную роль при определении основных корректирующих действий по управлению процессом. Благодаря высокой чувствительности, пропускной способности и универсальности система Candela 8520 является экономически выгодным решением, подходящим как для разработки производственного процесса, так и для контроля крупносерийного производства.

УДК.621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.626.629

# Динамика факторов и параметров чистых производственных помещений

## Dynamics of Factors and Parameters for Cleanroom

**Маркин А. В., Просий А. Д.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*almarkin@niime.ru*

**Markin A. V., Prosii A. D.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*almarkin@niime.ru*

Исследованы причинно-следственные связи между динамическим изменением характеристик приборов и технологии микро- и наноэлектроники и изменением требований к средам, в которых ведется это производство. Показано, как для обеспечения растущих требований внедрялись новые факторы, определяющие работу ЧПП.
**Ключевые слова:** технологическая среда; факторы и параметры; минимальные проектные нормы; инженерные решения.

The paper highlights cause-and-effect relationships between the dynamic change in the characteristics of devices and the technology of micro- and nanoelectronics and the change in the requirements for the environments in which this production is being carried out. It has been shown how new factors determining the work of the NWP were introduced to meet the growing requirements.
**Keywords:** technological environment; factors and parameters; minimal design rules; engineering solutions.

Представляет интерес динамика изменений набора факторов, определяющих требования к среде, в которой велось микроэлектронное производство. Отметим ключевые моменты в этой динамике. Данная работа посвящена изучению динамики развития факторов производственной среды, влияющих на микро- и наноэлектронное производство[1].

Можно выделить пять исторических этапов развития микроэлектроники.

**I этап**. Первая половина 60-х годов. Степень интеграции — до 100 элементов на кристалл. Минимальный размер элементов — 10 мкм.

**II этап.** Вторая половина 60-х годов — первая половина 70-х годов. Степень интеграции — 100–1000 элементов на кристалл. Минимальный размер элементов — 2,0 мкм.

[1] В данной работе будут рассматриваться только факторы, определяющие технологию, связанные с производственной средой. Другие группы факторов, к которым следует отнести факторы производственного оборудования, технологических сред, проектирования и технологии производства, технической документации, исполнительской документации и др., в данной работе не рассматриваются.

**III этап.** Вторая половина 70-х годов. Степень интеграции — >1000 элементов на кристалл. Минимальный размер элементов — 1,0 мкм.

**IV этап.** Начало 80-х годов — середина 90-х годов. Степень интеграции — >10000 элементов на кристалл. Минимальный размер элементов — 0,1–0,2 мкм.

**V этап.** Конец 90-х годов — наше время. СБИС, УБИС. Минимальный размер элементов — от 0,01 мкм. Динамика изменения минимальных размеров элементов в этот период и прогноз представлены в дорожных картах для микроэлектроники. Интересно наблюдать, как менялись прогнозы с течением времени в ITRS разного периода издания.

На рис. 1 графически показана связь перечисленных аргументов с временной шкалой.

На рис. 2 схематически показаны факторы, характеризующие технологическую среду микроэлектронного производства. Показаны ключевые этапы развития технологии чистоты.

***Заключение***

В настоящей работе детально рассмотрены приведенные факторы, причины и основания для их введения, а также динамика параметров этих факторов как в качественном (добавление параметров), так и в количественном (ужесточение требований) аспекте.

Предложены алгоритмы выбора комплекта факторов и их параметров, необходимых и достаточных для обеспечения надлежащей технологической среды для рассматриваемой технологии микроэлектроники.

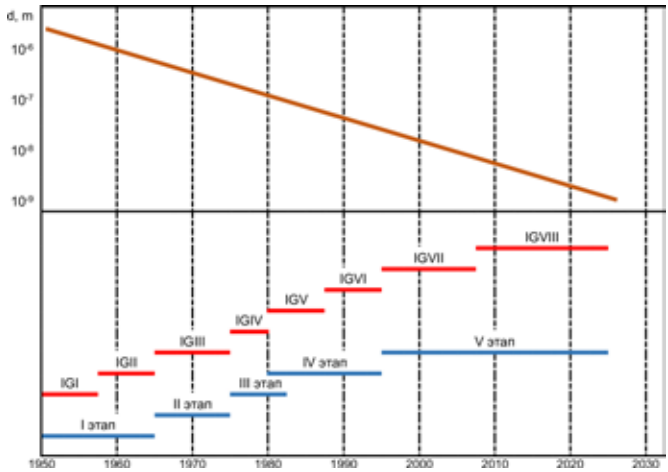



**Рис. 1.** Сопоставление различных шкал развития технологий микроэлектроники. В логарифмическом масштабе динамика уменьшения размеров элементов L описывается линией, близкой к прямой

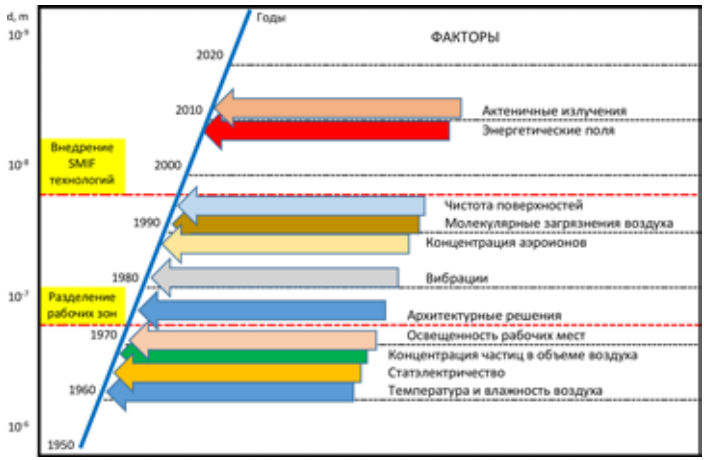



**Рис. 2.** Динамика введения факторов, характеризующих технологическую среду микроэлектронного производства

***Литература***


1. Авдонин Б. Н., Мартынов В. В. Электроника. Вчера, сегодня. Завтра? — Москва: издательский центр «ДЕКА», 2005 г.
2. Коваленко А. А., Петропавловский М. Д. Основы микроэлектроники. — Москва: издательский центр «Академия», 2006.
3. ГОСТ Р 56640-2015 «Чистые помещения. Проектирование и монтаж. Общие требования».
4. ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 4. Проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию».
5. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
6. International Roadmap For Devices and Systems, 2017 Edition.
7. International Technology Roadmap For Semiconductors, 2015 Edition.
8. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника. Часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника, 2017. — Серия 3. — Выпуск 1 (165). — С. 51–69.
9. SEMI E76-0913. Guide for 300 mm Process Equipment Points of Connection to Facility Services.
10. SEMI E51-0200. Guide for Typical Facilities Services and Termination Matrix.
11. IEST. CC012. Considerations in Cleanroom Design.
12. IEST. CC048. Guidance for Design, Performance, and Operations of Controlled Environments per USP.
13. SEMI E10-0814. Specification for definition and measurement of equipment reliability, availability and maintainability (RAM) and utilization.

14. Мартынов В. В. Современный взгляд на обеспечение чистоты в субмикронных производствах СБИС // Чистые помещения и технологические среды. — № 1/2002.
15. Bhatia A. A Basic Design Guide for Clean Room Application, PDH Course M143, 2012.
16. Pavlotsky R. V. Fifteen Factors affecting the choice of the Project and the Cost of building a Clean Room // CleanRooms Magazine, July, 2004.
17. Sunderland T. What you need to know when choosing a Clean Room Project. Controlled Environments Magazine, a Vicon Publishing Inc.

УДК 004.8 + 004.27 + 538.9 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.630.632

# Нейроморфный компьютер: от физических компонент до системы ценностей

## Neuromorphic Computer — from Physical Components to a Value System

**Демин В. А.[1], Нехаев Д. В.[1,2], Емельянов А. В.[1,2], Никируй К. Е.[1], Суражевский И. А.[1], Миннеханов А. А.[1], Рыльков В. В.[1], Ковальчук М. В.[1,2,3]**
*[1] НИЦ «Курчатовский институт»*
*123182, г. Москва, Россия*
*demin.vyacheslav@mail.ru*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[3] МГУ им. М. В. Ломоносова*
*119234, Россия, г. Москва*

**Demin V. A.[1], Nekhaev D. V.[1,2], Emelyanov A. V.[1,2], Nikiruy K. E.[1], Surazhevskiy I. A.[1], Minnekhanov A. A.[1], Rylkov V. V.[1], Kovalchuk M. V.[1,2,3]**
*[1] NRC Kurchatov Institute*
*Moscow, 123182, Russia*
*demin.vyacheslav@mail.ru*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia*
*[3] Lomonosov Moscow State University*
*Moscow, 19991, Russia*

Представлен оригинальный способ математического обоснования оптимальных локальных правил обучения спайковых нейронных сетей (СНС) с частотным кодированием информации и их возможная связь с правилами обучения типа STDP. Обсуждаются подходы к реализации системы ценностей интеллектуального агента на базе локальных правил обучения с подкреплением в СНС. Также демонстрируются возможные аппаратные решения для моделей нейронов и синаптических весов на базе оригинальных мемристоров, подходящих для указанных типов локального обучения. Таким образом, представлена попытка обоснования компонент, необходимых для будущих нейроморфных систем универсального искусственного интеллекта на основе СНС.
**Ключевые слова:** нейроморфные вычисления; спайковые нейронные сети; локальные правила обучения; STDP; обучение без учителя; мемристор.

The paper presents an original method of mathematical substantiation of optimal local rules for training Spiking Neural Networks (SNN) and their possible connection with STDP-type learning rules. Besides, it offers approaches to the implementation of an agent's value system based on local rules of reinforcement learning in SNN, as well as gives possible hardware solutions for neuron models and synaptic weights based on original memristors suitable for these types of local learning. Thus, an attempt

has been made to validate the components necessary for future neuromorphic SNN-based systems of universal artificial intelligence.

**Keywords:** neuromorphic computing; spiking neural networks; local training rules; STDP; unsupervised learning; memristor.

Импульсные, или спайковые, нейронные сети (СНС) — третье поколение искусственных нейронных сетей, с которым связывают возможность построения энергоэффективных самообучающихся нейроморфных систем для решения динамических адаптационных и когнитивных задач в реальном времени. Будучи наиболее биологически правдоподобными, СНС обусловливают потенциальную перспективу создания на их основе систем универсального искусственного интеллекта (ИИ), то есть способного к мультимодальной обработке информации с обобщением и логическим выводом новых данных, не содержавшихся в обучающих наборах данных. Продемонстрировано значительное число примеров успешного обучения и решения относительно простых задач с использованием СНС, однако переход к комплексным задачам затруднен ввиду целого ряда проблем, главные из которых:

1) отсутствие оптимальных локальных правил настройки синаптических связей в СНС;
2) большое разнообразие моделей нейронов с разной степенью биоподобия ввиду недостатка моделей СНС системного уровня, определяющих минимальный набор необходимых требований к нейронам как базовым элементам обработки информации в системах универсального ИИ;
3) ограниченный (в том числе по причине двух вышеуказанных проблем) спектр аппаратных решений, требуемых для эффективной эмуляции алгоритмов на основе СНС при их обучении, валидации и решении когнитивных задач в режиме реального времени.

В настоящей работе представлен оригинальный способ обоснования оптимальных правил локальной настройки синаптических связей СНС с частотным кодированием информации и их возможная связь с правилами ассоциативного обучения типа динамической пластичности, зависящей от временных задержек между импульсами (STDP). Обсуждаются подходы к реализации локальных правил дофаминоподобного обучения с подкреплением в СНС, которые необходимы для формирования аналога системы ценностей (или потребностей) интеллектуального агента в процессе его автономного функционирования. Демонстрируются возможные аппаратные решения как для нейрональных элементов, так и для синаптических связей на базе перспективных мемристивных устройств, подходящих для указанных типов локального обучения. Таким образом, представлена попытка систематизации существующих и оригинальных способов реализации самообучающихся СНС для создания в перспективе на их основе нейроморфных систем универсального ИИ.

***Работа поддержана грантом РФФИ № 18-29-23041.***

Pulsed, or Spiking, Neural Networks (SNN) are the third generation of artificial neural networks, which is associated with the possibility of building energy-efficient and self-learning neuromorphic systems for solving dynamic adaptation and cognitive tasks in real time. Being the most biologically plausible, SNN are promising in creating universal

artificial intelligence (AI) systems, that is, capable of multimodal information processing with generalization and inference of new data that were not included in training data sets. A lot of examples of successful training to solve relatively simple tasks using SNN have been demonstrated, but the transition to complex problems is difficult due to a number of issues, the main of which are:

1) the lack of optimal local learning rules for an update of synaptic connections in SNN;
2) a wide variety of neuron models with different degree of biosimilarity, due to the lack of system-level SNN models that define a minimal set of necessary requirements for neurons as the basic information processing elements in universal AI systems;
3) a limited (including due to the two above-mentioned problems) range of hardware solutions required for effective emulation of SNN algorithms during their training, validation and solving cognitive tasks in real time.

This work presents an original method for substantiating the optimal local learning rules for tuning synaptic connections in SNN with rate coding of information and their possible connection with the rules of STDP-type associative learning. Approaches to the implementation of local rules of dopamine-like reinforcement learning in SNN have been discussed. Such rules are necessary for the formation of some kind of an agent's system of values (or needs) in the process of its autonomous functioning. Possible hardware solutions for both neuronal elements and synaptic weights based on promising memristive devices suitable for these types of local learning have been demonstrated. Thus, an attempt has been made to systematize the existing and original ways of implementing self-learning SNN in order to create in future the neuromorphic systems for universal AI.

***The work was supported by RFBR № 18-29-23041 grant.***

УДК 538.9 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.633.634

# Временное и частотное кодирование образов для обучения импульсных нейроморфных сетей на основе мемристоров

## Temporal and Rate Coding of Patterns for Spiking Neuromorphic Networks Based on Memristors Learning

**Емельянов А. В.[1], Никируй К. Э.[1], Ильясов А. И.[1], Суражевский И. А.[1], Ситников А. В.[1,2], Рыльков В. В.[1], Демин В. А.[1]**
*[1] НИЦ «Курчатовский институт»*
*123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1*
*[2] Воронежский государственный технический университет*
*394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Emelyanov A. V.[1], Nikiruy K. E.[1], Ilyasov A. I.[1], Surazhevsky I. A.[1], Sitnikov A. V.[1,2], Rylkov V. V.[1], Demin V. A.[1]**
*[1] National Research Center "Kurchatov Institute"*
*1 Akademika Kurchatova Square, Moscow, 123182*
*[2] Voronezh State Technical University*
*84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh, 394006*

В работе исследованы мемристоры на базе нанокомпозита (НК) (CoFeB)x(LiNbO3)1-x и построена на их основе импульсная нейроморфная сеть (ИНС) с четырьмя входными и одним выходным нейроном. Было показано, что в ИНС на основе НК мемристивных синапсов, помимо частотного, возможно и временное кодирование образов.
**Ключевые слова:** мемристор; импульсные нейронные сети; нейроморфные вычисления.

In this work, memristors based on the nanocomposite (NC) (CoFeB)x(LiNbO3)1-x were investigated and a spiking neuromorphic network (SNN) with 4 input and 1 output neurons was built on their basis. It was shown that in SNN based on NC memristive synapses, in addition to frequency, temporal coding of images is also possible.
**Keywords:** memristor; spiking neural networks; neuromorphic computing.

Вычислительные машины, базирующиеся на архитектуре фон Неймана, успешно справляются с большинством современных вычислительных задач, однако их применение при решении когнитивных задач (распознавание образов, текстов и речи, обобщение, прогнозирование и т. д.) не всегда оптимально [1]. В этом отношении нейроморфные вычислительные сети на базе мемристоров, имитирующих синапсы, могут оказаться значительно более производительными и эффективными [2].

В случае так называемых формальных нейроморфных сетей точность их обучения требует многослойной архитектуры, что снижает энергоэффективность, и большого объема размеченных баз данных, что сужает круг решаемых задач. Недавние исследования мемристорных импульсных (спайковых) нейроморфных сетей (ИНС) показали, что при их обучении по биоподобным алгоритмам, например по правилам синаптической пластичности, зависящей от времени прихода импульсов (spike-timing-dependent plasticity, STDP), удается значительно снизить

зависимость точности классификации образов от разброса характеристик мемристоров [3]. Несмотря на большой потенциал, вычислительные возможности ИНС не были широко продемонстрированы, особенно в сравнении с формальными сетями, в первую очередь из-за недостатка эффективных алгоритмов обучения [4]. Наиболее перспективными подходами являются частотное или временное кодирование информации и соответствующее обучение ИНС по правилам STDP [5]. Поэтому целью данной работы было изучение возможности обучения ИНС на базе НК-мемристоров как с временным, так и частотным кодированием информации.

***Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-2203.2021.1.2).***

***Литература***

1. Berggren K. et al. Nanotech. 2021. 32, 012002.
2. Shchanikov S. et al. Chaos, Solit. Fract. 2021. 142. 110504.
3. Emelyanov A. V. et al. Nanotech. 2020. V. 31. P. 045201.
4. Xia Q., Yang J. J. Nat. Mat. 2019. 18. 309–323.
5. Stöckl C., Maass W. Nat. Mach. Int. 2021. V. 3. № 3. P. 230–238.

Computing machines based on the von Neumann architecture successfully cope with most modern computational problems, however, their application in solving cognitive problems (recognition of images, texts and speech, generalization, forecasting, etc.) is not always optimal [1]. In this respect, neuromorphic networks based on memristors that mimic synapses can be significantly more productive and efficient [2].

In the case of the so-called formal neuromorphic networks, the accuracy of their training requires a multilayer architecture, which reduces energy efficiency, and a large volume of labeled datasets, which narrows the range of tasks to be solved. Recent studies of memristor spiking neuromorphic networks (SNNs) have shown that when they are trained according to biosimilar algorithms, for example, according to the rules of spike-timing-dependent plasticity (STDP), it is possible to significantly reduce the dependence of accuracy classification of patterns from the variations of characteristics of memristors [3]. Despite the great potential, the computational capabilities of SNNs have not been widely demonstrated, especially in comparison with formal networks, primarily due to the lack of effective learning algorithms [4]. The most promising approaches are frequency or time coding of information and the corresponding training of the ANN according to the STDP rules [5]. Therefore, the purpose of this work was to study the possibility of training SNN based on NC memristors with both time and frequency coding of information.

***This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (MK-2203.2021.1.2).***

***References***

1. Berggren K. et al. Nanotech. 2021. 32, 012002.
2. Shchanikov S. et al. Chaos, Solit. Fract. 2021. 142. 110504.
3. Emelyanov A. V. et al. Nanotech. 2020. V. 31. P. 045201.
4. Xia Q., Yang J. J., Nat. Mat. 2019. 18. 309–323.
5. Stöckl C., Maass W. Nat. Mach. Int. 2021. V. 3. № 3. P. 230–238.

УДК 519.876.5 + 004.89 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.635.637

# Эффект стабилизации синаптических весов нейросети под действием входного шумового сигнала

## Neural Network Synaptic Weights Stabilization Effect Under the Influence of an Input Noise Signal

**Суражевский И. А., Демин В. А.**
*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*
*123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1*
*isurazhevsky@yandex.ru, demin_va@nrcki.ri*

**Surazhevsky I. A., Demin V. A.**
*National Research Center "Kurchatov Institute"*
*1 Academika Kurchatova Square, Moscow, 123182*
*isurazhevsky@yandex.ru, demin_va@nrcki.ri*

На примере обучения синаптических связей импульсного нейрона в численном моделировании показана возможность стабилизации весов под действием входного шумового сигнала низкой частоты. Обозначена зависимость данного эффекта от времени хранения резистивного состояния и напряжений переключения при реализации синаптических связей на основе мемристивных структур.
**Ключевые слова:** генератора сигналов; HDL-модель; мемристор; стабилизация синаптических весов.

On example of pulsed neuron training in numerical modeling, the possibility of synaptic weights stabilization under the action of low-frequency input noise signal is shown. The dependence of this effect from retention time and switching voltages in case of memristive synaptic weights is indicated.
**Keywords:** signal generator; HDL model; memristor; synaptic weight stabilization.

В данной работе представлен анализ возможности поддержания ранее установленных (в процессе предобучения) значений синаптических весов однослойной спайковой нейронной сети за счет подачи на все ее входы низкочастотного шумового сигнала с одной и той же средней частотой (то есть не кодирующего какой-либо паттерн). Этот вопрос особенно важен в свете неидеальности характеристик реальных мемристивных элементов, например конечных времен удержания резистивного состояния и т. п. [1].

Для выполнения исследования было разработано HDL-описание генератора шумовых сигналов для формирования пуассоновских последовательностей импульсов на входе нейросети, а также проведена доработка возможностей модели мемристора VTEAM [3]: добавлена поддержка времени хранения резистивного состояния и разброса напряжений переключения от устройства к устройству. Эксперимент проводился на примере спайковой нейросети «4 к 1» (рис. 1*а*) и состоял из двух серий запусков: десять запусков для различных времен хранения и десять для напряжений переключения (см. подробнее в описании рис. 1). Согласно полученным результатам для возникновения эффекта стабилизации время хранения состояния должно составлять не менее 1000 секунд (рис. 1) при разбросе

напряжений переключения не более 10 %. При этом необходимо отметить, что также наблюдалось дообучение синаптических связей под действием шумового сигнала, что открывает возможность надежного поддержания состояния весов нейросети, созданных на основе элементов с неидеальными характеристиками.

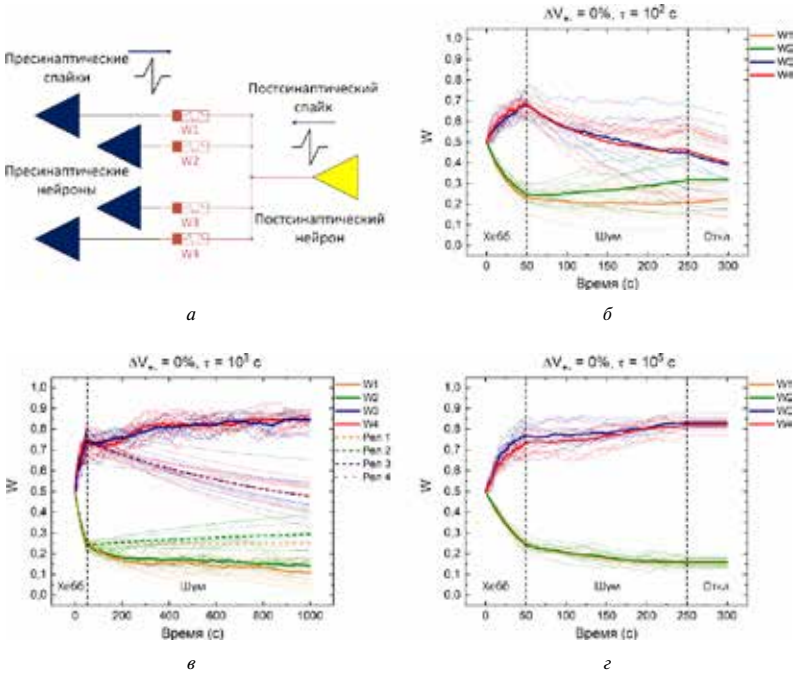



**Рис. 1.** Схематическое изображение спайковой нейронной сети «4 к 1» (*а*). Статистическая зависимость сиаптического веса от времени при моделировании импульсной сети с различным временем сохранения состояния: *б*) $10^2$ с; *в*) $10^3$ с; *г*) $10^5$ с; при постоянном напряжении переключения мемристора ($\Delta V_{+-} = 0$ %); жирным шрифтом выделены средние значения поведения, рассчитанные для каждого из десяти экспериментальных запусков. Каждый эксперимент состоял из этапа обучения «хебб» в первые 50 секунд с распределенными по времени последовательностями импульсов Пуассона с разными средними частотами на разных входах: 1 Гц для *W1* и *W2*, 10 Гц для *W3* и *W4*; этапа «шум» с подачей шумового сигнала со средней частотой 1 Гц на все входы в течение 200 с на (*б*), (*г*) и 950 с на (*в*); этап «откл.», т. е. свободной релаксации резистивных состояний без какого-либо сигнала на входах в течение последних 50 секунд на графиках (*б*), (*г*) и (*в*) кривыми «Рел 1-4»

***Работа поддержана грантом РФФИ № 18-29-23041 в части разработки модели генератора сигналов и исследования эффекта шумовой стабилизации.***

***Литература***

1. Yao P., Wu H., Gao B., Tang J., Zhang Q., Zhang W., Yang J.J., Qian H. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network // Nature, 2020. Vol. 577. P. 641–646.
2. Kvatinsky S., Ramadan M., Friedman E.G., Kolodny A. VTEAM: A General Model for Voltage-Controlled Memristors // IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs, 2015. Vol. 62. P. 786–790.

In this work, we present an analysis of the possibility of maintaining the set values of the synaptic weights, in the process of pre-training, of a single-layer spiking neural network (SNN) by supplying all its inputs with a low-rate noise signal with the same average pulse frequency. This signal does not encode any useful pattern, so we consider it as the noise pattern, or simply the noise. The given question is particularly important in light of different sources of real memristive device non-idealities such as the finite retention times of resistive states and others [1].

To carry out the research, an HDL model of a noise signal generator for the input Poisson pulse sequences formation was developed and the capabilities of the VTEAM memristor model were improved [2]: retention time and device-to-device voltage variation were added. The experiment was carried out on 4-to-1 spiking neural network (Fig. 1*a*) and consisted of two series of runs: 10 for different retention times and 10 for different switching voltages variations (see details in the description of Fig. 1).

According to the results obtained, for the weight stabilization effect to occur, the retention time should be at least 1000 seconds (Fig. 1), with a switching voltage variation of no more than 10%. At the same time, it should be noted, there was also an additional training of synaptic weight under the influence of a noise signal, that opens up the possibility of reliably maintaining the state of the neural network weights which are created on the basis of elements with non-ideal characteristics.

***This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-29-23041) with regard to signal generator developing and weights stabilization effect researching.***

***References***

1. Yao P., Wu H., Gao B., Tang J., Zhang Q., Zhang W., Yang J.J., Qian H. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network // Nature, 2020. Vol. 577. P. 641–646.
2. Kvatinsky S., Ramadan M., Friedman E.G., Kolodny A. VTEAM: A General Model for Voltage-Controlled Memristors // IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs, 2015. Vol. 62. P. 786–790.

УДК 004.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.638.640

# Программно-аппаратная платформа «Эльбрус» для решения задач искусственного интеллекта

## Elbrus Software and Hardware for AI

**Бочаров Н.А.**
*ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука»*
*119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24*
*bocharov.na@phystech.edu*

**Bocharov N. A.**
*Brook INEUM PJSC*
*24 Vavilov St., Moscow, 119334, Russia*
*bocharov.na@phsytech.edu*

В докладе показаны существующие и перспективные решения на базе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для решения задач искусственного интеллекта. Представлены существующие и перспективные разработки. Результаты показаны на задачах технического зрения, управления группой роботов и диагностики.
**Ключевые слова:** «Эльбрус»; искусственный интеллект; вычислительная техника; робототехника.

The report shows existing and promising solutions based on the Elbrus hardware and software for solving artificial intelligence problems. Existing and prospective developments have been presented, as well as results shown on the tasks of technical vision, control of a group of robots and diagnostics.
**Keywords:** Elbrus; artificial intelligence; computer; robotics.

В докладе показаны существующие и перспективные решения на базе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для решения задач искусственного интеллекта. Рассмотрены примеры прикладных задачи, таких как техническое зрение и управление группой роботов.

Архитектура «Эльбрус» (E2k) — оригинальная лицензионно-чистая отечественная разработка, основанная на принципе широкого командного слова (VLIW), предполагающего одновременное исполнение множества операций обработки информации (25–48 оп. за такт, явный параллелизм операций). Микропроцессоры на архитектуре «Эльбрус» различаются версиями микроархитектуры и системы команд.

На базе микропроцессоров «Эльбрус» реализован и серийно выпускается широкий спектр вычислительных устройств различных форм-факторов, в том числе в защищенном конструктиве для промышленного или бортового применения [1].

Появление новых микропроцессоров, таких как «Эльбрус-16С» и «Эльбрус-2С3», дает новые возможности для разработчиков искусственного интеллекта [2] за счет расширенной системы команд и аппаратной поддержки виртуализации.

Для демонстрации возможности применения вычислительных устройств серии «Эльбрус» для решения задач искусственного интеллекта разработаны

программные средства, моделирующие типовые задачи современных робототехнических комплексов, такие как техническое зрение, поиск пути и построение карты местности, контроль и диагностика с использованием сторожевого таймера и модуля привязки времени [3].

Проведенные экспериментальные исследования с использованием разработанных моделирующих средств и опыт использования вычислительной техники ряда «Эльбрус» показали, что микропроцессоры серии «Эльбрус» могут успешно использоваться для решения широкого ряда задач искусственного интеллекта.

***Литература***

1. Бычков И. Н., Лобанов И. Н., Молчанов И. А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для перспективных информационных систем // Приборы, 2018. — № 8 (218). — С. 14–20.
2. Фельдман В. М., Волин В. С., Черепанов С. А. и др. Решение задач робототехники на перспективных отечественных вычислителях // Приборы, 2021. — № 5 (251). — С. 28–35.
3. Bocharov N., Paramonov N., Vorobushkov V., Slavin O. Disaster Tolerance of On-Board Control Systems for Ground Robots // Communications in Computer and Information Science (см. в книгах). 2020. V. 1. 1140 CCIS. P. 211–222. DOI 10.1007/978-3-030-37436-5_19.

The report shows existing and promising solutions based on the Elbrus hardware and software for solving artificial intelligence tasks. Examples of applied tasks, such as technical vision and control of a group of robots, have been considered.

The Elbrus architecture (E2k) is an original license-pure Russian development based on the principle of a wide command word (VLIW), which assumes the simultaneous execution of many information processing operations (25–48 op. per clock cycle, explicit parallelism of operations). Microprocessors based on the Elbrus architecture differ in the versions of the microarchitecture and the command system.

A wide range of computing devices of various form factors, including in a protected design for industrial or on-board applications, has been implemented and is being mass-produced on the basis of Elbrus microprocessors [1].

The release of new microprocessors, such as Elbrus-16S and Elbrus-2S3, provide new opportunities for developers of artificial intelligence [2], due to an expanded command system and hardware support for virtualization.

To demonstrate the possibility of using computing devices of the Elbrus series to solve artificial intelligence problems, software tools have been developed that simulate typical tasks of modern robotic complexes, such as technical vision, path finding and terrain mapping, monitoring and diagnostics using a watchdog timer and a time binding module [3].

The conducted experimental studies using the developed modeling tools and the experience of using computer technology of the Elbrus series have shown that the microprocessors of the Elbrus series can be successfully used to solve a wide range of artificial intelligence tasks.

***References***

1. Bychkov I. N., Lobanov I. N., Molchanov I. A. Vychislitel'naya tekhnika na osnove apparatno-programmnoi platformy "Elbrus" dlya perspektivnykh informatsionnykh sistem // Pribory, 2018. № 8. P. 14.
2. Fel'dman V. M., Volin V. S., Cherepanov S. A. et al. Reshenie zadach robototekhniki na perspektivnykh otechestvennykh vychislitelyakh // Pribory, 2021. № 5 (251). P. 28–35.
3. Bocharov N. et al. Disaster Tolerance of On-Board Control Systems for Ground Robots // International Conference on Convergent Cognitive Information Technologies. Springer, Cham, 2018. P. 211–222.

УДК 004.932.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.641.642

# Решение задач современного HPC на когнитивной платформе RoboDeus SHB

## Solving the Problems of Modern HPC on the Cognitive RoboDeus SHB Platform

**Янакова Е. С.[1,2], Колесников Д. С.[1], Мачарадзе Г. Т.[1]**
*[1] АО «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд № 4922, 4, стр. 2*
*secretary@elvees.com*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*helen@elvees.com*

**Yanakova E. S.[1,2], Kolesnikov D. S.[1], Macharadze G. T.[1]**
*[1] R&D Center "ELVEES", JSC*
*bld. 2, 4 Lane 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*secretary@elvees.com*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*helen@elvees.com*

Предлагаются методы решения задач современных высокопроизводительных вычислений на когнитивной платформе НПЦ «ЭЛВИС». Изложены требования к платформам подобного класса, организация вычислительных процессов с использованием нейросетевых алгоритмов, включая задачу прямого хода и обучения. Приведены схемы обучения нейросетей с использованием платформы ГНС разработки ФГУП «ГосНИИАС».
**Ключевые слова:** когнитивная платформа; современные высокопроизводительные вычисления; алгоритмы искусственного интеллекта.

The paper offers methods for solving problems of modern high-performance computing on the cognitive platform of the R&D Center "ELVEES". Besides, it presents the requirements for platforms of this class, the organization of computational processes using neural network algorithms, including the problem of forwarding movement and learning. The schemes for training neural networks using the GNS platform, developed by GosNIIAS, have been presented.
**Keywords:** cognitive platform; modern high-performance computing; artificial intelligence algorithms.

В основе облачных вычислений, HPC (high performance computing), ИИ, 5G, Edge лежат высокопроизводительные вычисления. Конвергенция HPC, обработки больших данных (BigData) и вычислительных систем для глубокого обучения стала дополнительным импульсом для развития гетерогенной архитектуры построения вычислительных систем. Отражением этой тенденции стали интеграция в единую систему вычислительных ядер разной архитектуры, объединяющих ускорители векторных, матричных и специализированных операций; развитие

новых высокопроизводительных интерконнектов и параллельных файловых систем, а также другие технологии, способствующие развитию современного HPC. Зная и понимая текущую ситуацию, не забывая о вопросах энергопотребления, НПЦ «ЭЛВИС» продолжает развивать концепцию построения гетерогенных высокопроизводительных вычислительных систем на кристалле, выпустив процессор RoboDeus [1].

**Рис. 1.** Концептуальная схема архитектурного решения процессора RoboDeus

Концептуальная схема когнитивной платформы RoboDeus SHB (рис. 1) основана на использовании CPU-ядер с поддержкой большого количества программного обеспечения, включая операционную систему семейства Linux, и ELcore-ускорителей для решения основных вычислительных задач. Совместимость программного обеспечения в платформе для широкого класса задач достигается за счет поддержки стандартных технологий низкоуровневой программной модели OpenCL и MPI. На высоком уровне поддерживаются фреймворки различного назначения: начиная с экосистем машинного обучения, в частности платформы ГНС, заканчивая экосистемой по обработке больших данных (BigData).

В данной работе новыми являются следующие результаты: концептуальная схема решения вычислительных задач современного HPC с использованием гетерогенной платформы RoboDeus SHB, методика и схема обучения нейросетей с использованием платформы ГНС, численные результаты запуска нейросетей на процессоре RoboDeus.

***Литература***

1. Процессор 1892ВМ248 RoboDeus [Электронный ресурс]. URL: https://multicore.ru/processors-multicore/robodeus (дата обращения: 10.08.2021).

УДК 004.3 + 004.9 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.643.645

# Информационная поддержка для многомасштабного моделирования нейроморфных систем

## Information Support for Multiscale Modeling of Neuromorphic Systems

**Абгарян К. К.**[1,2], **Гаврилов Е. С.**[1,2]
[1] *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)*
*119333, г. Москва, Вавилова, 44, корп. 2*
[2]*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ)*
*119991, г. Москва, Ленинские горы, 1*

**Abgaryan K. K.**[1,2], **Gavrilov E. S.**[1,2]
[1] *Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (FRC IU RAS).*
*bld. 2, 44 Vavilova St., Moscow, 119333*
*kristal83@mail.ru*
[2] *Lomonosov Moscow State University*
*GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia*

Разработан программный комплекс, представляющий собой независимо развертываемое веб-приложение с собственной базой данных, обеспечивающий возможность проведения мультифизических и многоуровневых расчетов для электронных устройств с элементами магнитной энергонезависимой памяти. С помощью данного комплекса возможно проводить оптимизацию параметров таких устройств и исследовать возможности их дальнейшей миниатюризации.
**Ключевые слова:** программный комплекс; многомасштабное моделирование; мемристоры; нейроморфные системы.

A software package has been developed, which is an independently deployable web application with its own database, which provides an ability to carry out multiphysics and multilevel calculations for electronic devices with magnetic nonvolatile memory elements. With the help of this complex, it is possible to optimize the parameters of such devices and explore possibilities of their further miniaturization.
**Keywords:** software package; multiscale modeling; memristors; neuromorphic systems.

Разработано программное обеспечение для имитационного моделирования работы нейроморфных систем на базе интеграционной платформы многомасштабного моделирования, объединяющей информационные потоки на различных масштабных уровнях: на уровне мемристоров — новых элементов резистивной памяти, на уровне нейроморфной сети, на уровне имитации обучения нейроморфной сети по прецедентам [1–3].

В основе данной оригинальной разработки лежит уникальная информационная технология построения многомасштабных моделей, основанная на теоретико-множественном представлении физических моделей и модельно-ориентированном подходе с использованием информационных структур, объединяющих данные и методы их обработки[1].

Программный комплекс представляет собой независимое развертываемое веб-приложение с собственной базой данных, позволяющее проектировать и выполнять сценарии многомасштабных расчетов, запуская отдельные модули в заданном порядке и обеспечивая обмен данными между входными/выходными параметрами в автоматическом режиме. Декларативное задание сценариев многомасштабных расчетов позволяет создавать интерфейс пользователя для быстрого дизайна новых сценариев. Предусмотрен универсальный веб-интерфейс пользователя для задания входных параметров, мониторинга и контроля исполнения сценариев многомасштабных расчетов. Такой подход обеспечивает возможность оперативной настройки и проведения мультифизических и многоуровневых исследований для различных электронных устройств с элементами магнитной энергонезависимой памяти. С помощью данного комплекса возможно проводить оптимизацию параметров таких устройств и исследовать возможности их дальнейшей миниатюризации.

Использование данного программного обеспечения позволяет проводить серии вычислительных экспериментов в целях оптимизации элементной базы и структуры нейроморфных сетей применительно к задачам интеллектуального анализа данных.

***Работа поддержана РФФИ, проект № 19-29-03051 МК.***

***Литература***

1. Абгарян К. К. Многомасштабное моделирование в задачах структурного материаловедения: монография. — М.: МАКС Пресс, 2017. — 284 с.
2. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Mathematical model of a neuromorphic network based on memristive elements // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 143. 110548. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110548.
3. Абгарян К. К., Гаврилов Е. С. Интеграционная платформа для многомасштабного моделирования нейроморфных систем // Информатика и ее применение, 2020. — Т. 14. — Вып. 2. — С. 98–104.

Software has been developed for simulating the operation of neuromorphic systems based on an integration platform for multiscale modeling that unites information flows at various scale levels — at the level of memristors — new elements of resistive memory, at the level of a neuromorphic network, at the level of imitation of training a neuromorphic network by precedents[1–3].

This original development is based on a unique information technology for constructing multiscale models based on a set-theoretical representation of physical models and a model-oriented approach using information structures that combine data and methods for their processing [1].

The software package is an independent deployable web application with its own database that allows you to design and execute scripts of multiscale calculations, launching individual modules in a given order and providing data exchange between input/output parameters in automatic mode. Declarative definition of multiscale computation scenarios allows you to create a user interface for the rapid design of new scenarios. A universal Web-based user interface has been provided for setting input parameters, monitoring and controlling the execution of multiscale calculations scenarios. This approach provides an ability to quickly

configure and conduct multiphysics and multilevel studies for various electronic devices with magnetic nonvolatile memory elements. With the help of this complex, it is possible to optimize parameters of such devices and explore possibilities of their further miniaturization.

The use of this software allows a series of computational experiments to be carried out in order to optimize the element base and structure of neuromorphic networks in relation to the tasks of data mining.

***This work was supported by the RFBR, project № 19-29-03051 MK.***

***References***

1. Abgaryan K. K. Multiscale modeling in problems of structural materials science. — M.: MAX Press. 2017.284 p. Monograph.
2. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L., Mathematical model of a neuromorphic network based on memristive elements // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 143. 110548. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110548.
3. Abgaryan K. K., Gavrilov E. S. Integration platform for multiscale modeling of neuromorphic systems // Informatics and its application. 2020. Vol. 14. Issue 2. P. 98–104.

УДК 004.054 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.646.647

# Практика применения набора тестов MLPerf Inference для оценки характеристик нейросетевых вычислителей

## Practice of Using the MLPerf Inference Test Suite for Evaluating the Characteristics of Neural Network Computings

**Ландышев С. В.**
*ЗАО НТЦ «Модуль»*
*125190, г. Москва, 4-я ул. 8 марта, 3*
*landysh@module.ru*

**Landyshev S. V.**
*RC Module JSC*
*3 Eighth March 4th St., Moscow, 125190*
*landysh@module.ru*

В статье приводится краткий обзор системы тестирования MLPerf. Рассматриваются принципы применения тестовых наборов MLPerf Inference в контексте оценки бенчмарков производителем аппаратуры и разработчиком ПО для трансляции и оптимизации нейронных сетей.
**Ключевые слова:** MLPerf; Inference; LoadGen; нейронные сети; CNN; бенчмаркинг.

This article provides a brief overview of the MLPerf testing system. The principles of application of MLPerf Inference test suites are considered in the context of benchmark evaluation by a hardware manufacturer and a software developer for translation and optimization of neural networks.
**Keywords:** MLPerf; Inference; LoadGen; CNN; Benchmarking.

В статье приводится краткий обзор системы тестирования устройств и программного обеспечения для нейросетевых вычислений, предлагающей открытый механизм получения бенчмарков и поддержанной ведущими мировыми производителями (наборы тестов MLPerf).

Кроме краткого обзора MLPerf, в этой статье будут рассмотрены принципы применения системы тестирования MLPerf Inference в контексте оценки бенчмарков производителем аппаратуры и разработчиком ПО для трансляции и оптимизации нейронных сетей.

Система тестирования покрывает четыре типовые задачи, эффективно решаемые с применением нейронных сетей: классификация изображений, обнаружение объектов на изображениях, семантическая сегментация и машинный перевод текста. Для каждой из этих задач по обоснованиям разработчиков тестов выбраны соответствующие модели нейронных сетей и исходные тестовые данные, доступные для всех производителей тестируемых устройств.

MLPerf Inference состоит из четырех сценариев тестирования: однопоточный, многопоточный, серверный и автономный. Каждый из этих сценариев характеризуется своим правилом распределения нагрузки на тестируемую систему во времени и имитирует обработку в реальных системах обслуживания.

Необходимость выполнения сценариев в процессе тестирования определяется типом набора. В системе предлагаются следующие тестовые наборы.

Оценка выполняется для двух режимов работы — тест производительности и тест точности. В зависимости от сценария используются различные метрики для вычисления оценочного критерия.

**Таблица 1.** Наборы и сценарии

| Набор | Сценарии |
|---|---|
| Datacenter — центр хранения и обработки данных (ЦХОД) | Серверный и автономный |
| Edge — все, что не относится к ЦХОД | Однопоточный, автономный и многопоточный (опционально) |

Основной инструмент MLPerf — библиотека LoadGen, в которой реализуется генератор нагрузки. Библиотека распространяется в исходных кодах и имеет интерфейс C++. В состав MLPerf входят программные оболочки, позволяющие реализовать тесты на языке Python. Для применения LoadGen необходимо собрать библиотеку, связать с тестовой программой и по-своему реализовать набор виртуальных методов. Управление тестированием осуществляется через файлы конфигурации. В статье описывается практика использования LoadGen на языке C++.

Итогом тестирования являются текстовые лог-файлы, в которых отображается вся информация о ходе теста и результаты его выполнения, рассчитанные по соответствующим метрикам. В табл. 2 приведены основные критерии в режиме измерения производительности.

**Таблица 2.** Сценарии и критерии

| Сценарий | Основной критерий для производительности |
|---|---|
| Однопоточный | Задержка от начала обработки до выдачи результата (латентность). |
| Многопоточный | Производительность (запросов в секунду). Запросы формируются в несколько потоков. |
| Серверный | Производительность (запросов в секунду) при пуассоновском распределении поступления запросов. |
| Автономный | Производительность (запросов в секунду). |

Для оценки точности используются различные метрики в зависимости от класса задачи (табл. 3).

**Таблица 3.** Задачи и метрики оценки точности

| Класс задач | Метрика оценки точности |
|---|---|
| Классификация изображений | Top-1 |
| Обнаружение объектов на изображениях | mAP |
| Семантическая сегментация изображений | mIoU |
| Перевод | SacreBLEU |

Оценка точности выполняется с применением внешних инструментов, входящих в состав MLPerf, на основе данных, сформированных в LoadLib.

В статье производится анализ возможностей MLPerf и рассматриваются недостатки системы, выявленные при применении.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.648.649

# Искусственный электроник — система сильного гибридного интеллекта для исследований в микроэлектронике

## Artificial Electronics is a Strong Hybrid Intelligence System for Research in Microelectronics

**Дорофеев В. П.**
*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*
*vladislav.p.dorofeev@yandex.ru*

**Dorofeyev V. P.**
*SRISA RAS*
*bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218*
*vladislav.p.dorofeev@yandex.ru*

Представлена концепция сильного гибридного интеллекта для исследования естественных и создания искусственных систем и методологический подход к ее реализации — система автоматизации исследований в нейроморфных системах «искусственный электроник».
**Ключевые слова:** сильный интеллект; гибридный интеллект; нейроморфные системы.

Проблема создания сильного искусственного интеллекта — один из ключевых научных вызовов, над которым сейчас работают ведущие международные исследовательские центры [1]. Один из последних обзоров определений интеллекта дан в [2, 3].

В последние годы активизировались исследования в области гибридного человеко-машинного интеллекта [4]. В [5] была предложена архитектура сильного гибридного интеллекта, основанная на использовании системы имитационного моделирования вместе с системами интеллектуальной обработки информации для решения проблемы COVID-19. В [6] такой подход был реализован в Канаде. Дальнейшее исследование [7] продемонстрировало, что предложенная архитектура фактически используется в научных исследованиях с 30-х годов XX века [8] и идет последовательная работа по дальнейшей автоматизации выполняемых человеком задач как в ходе исследования естественных систем, так и при создании искусственных систем [9, 10].

Разработка современных нейроморфных высокопроизводительных комплексов является областью, объединяющей исследования естественных и создание искусственных систем, при этом речь идет об одних из самых сложных систем — мозге живого существа и высокопроизводительных системах, содержащих до 2,5 триллионов транзисторов [11].

Система «искусственный электроник» предназначена для того, чтобы отработать методологический подход по созданию системы сильного гибридного интеллекта на задаче исследований в области нейроморфных высокопроизводительных систем.

Ее ключевыми задачами являются:

- сбор информации о ведущихся исследованиях в области нейронаук, искусственного интеллекта и микроэлектроники;
- построение и уточнение моделей мозга, моделей ИИ-систем и микроэлектронных изделий на основе научных публикаций и других материалов;
- обеспечение интерактивного взаимодействия с пользователями системы.

Разрабатываемая система является аналогом системы, разрабатывавшейся в проекте DARPA «Большой механизм» [12], но предназначенной для нейроморфных высокопроизводительных систем. Для унификации моделирования изучаемых естественных и искусственных систем используется объектно-процессная методология [13]. Развитие системы происходит методом последовательной автоматизации исследовательского процесса [14].

***Литература***


1. Dunin-Barkowski W. Editorial: Toward and Beyond Human-Level AI. // Frontiers in Neurorobotics (2020).
2. Wang P. On Defining Artificial Intelligence // Journal of Artificial General Intelligence. 2019. 10(2):1–37.
3. Dagmar Monett et al. Special Issue “On Defining Artificial Intelligence” — Commentaries and Author’s Response // Journal of Artificial General Intelligence. 11 (2) (2020).
4. Zhiwen Yu, Qingyang Li, Fan Yang, Bin Guo. Human–machine computing // CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction (2021) 3:1–12.
5. Dorofeev V. et al. Super Intelligence to solve COVID-19 Problem // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV. P. 293–300. Springer. (2020).
6. Covi white paper / Hannah Alsdurf, Yoshua Bengio et al // ArXiv, 2005.08502 (2020).
7. Дорофеев В. Гибридный сильный интеллект и принципы Легасова, Ефремова и Моисеева // Actual Problems of Fundamental Science. P. 47–50. Volyn National University, Ukraine (2021).
8. Leontief W. Quantitative Input and Output Relations in the Economic System of the United States // Review of Economics and Statistics. 1936. P. 105–125.
9. Will Steffen et al. The emergence and evolution of Earth System Science // Nature Reviews Earth and Environment 1, 54–63 (2020).
10. Dorofeev V. Object-Process Methodology for Intelligent System Development // ArXiv: 2105.10387.
11. CS-2 White Paper / Cerebras Systems.
12. Big Mechanism / DARPA.
13. Dori D. Model-Based Systems Engineering with OPM and SysML. Springer, New York, USA, (2016).
14. Wil M. P. van der Aalst. Hybrid Intelligence: to automate or not to automate, that is the question // International Journal of Information Systems and Project Management (2021).

УДК 004.896 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.650.651

# Повышение эффективности автоматического ухода за сельскохозяйственными культурами на основе применения машинного зрения и методов искусственного интеллекта

## Improving the Efficiency of Automatic Care of Agricultural Crops Based on the Use of Machine Vision and Artificial Intelligence Methods

**Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б., Бельченко И. К.**
*ООО «Эрлаб»*
*129090, г. Москва, Большая Сухаревская пл., 9*
*5079311@gmail.com*

**Kir'yanov A. A., Benevolenskii S. B., Bel'chenko I. K.**
*Erlab LLC*

Представлены результаты разработки интеллектуальной системы роботизированного агротехнического комплекса, предназначенного для сбора и анализа данных почвенного покрова, заболеваний выращиваемых культур и прогресса их вегетации, внесения удобрений и удаления сорняков. Показаны особенности разрабатываемой системы и приведены ее достоинства.
**Ключевые слова:** интеллектуальные системы; роботизированный агротехнический комплекс; алгоритмы обработки данных.

The results of the elaboration of an intelligence system of a robotic agrotechnical complex aimed at the collection and analysis of data on the soil cover, diseases of cultivated crops, progress of their vegetation, fertilizer application, and weed removal are presented. Specific features and advantages of the elaborated system are characterized.
**Keywords:** intelligence systems; robotic agrotechnical complex; data processing algorithms.

Результаты применения искусственного интеллекта в сельском хозяйстве приводятся в значительном числе публикаций, например [1, 2].

В работе представлены результаты разработки интеллектуальной системы агротехнического комплекса, способного выполнять работы по:

1) сбору данных и анализу минерального и биологического состава почвы, а также ее влажности, электропроводности и температуры,
2) сбору данных и анализу по заболеваниям культур и прогрессу вегетации,
3) внесению удобрений и препаратов,
4) удалению сорняков.

Экспериментальный образец комплекса имеет следующие параметры:

- базы данных двух культур;
- идентификация признаков четырех заболеваний возделываемых растений.

В рассматриваемой системе данные от лидаров и скоростных камер обрабатываются распределенными алгоритмами для процессоров CUDA с использованием функций из библиотек машинного зрения Open CV 4. В разрабатываемой системе используется потоковая схема модулей искусственного интеллекта. Алгоритмы слияния, вычитания и финального дифференцирования образов формируют результирующую

полигонную модель. Алгоритм выбраковки сегментов образа формирует данные для расчета нейронной сетью.

Это позволяет повысить производительность распознания и увеличить скорость тренировки сетей типа U-net при глубоком обучении с использованием библиотек TensorFlow за счет автоматической отбраковки как изображений целиком, так и сегментов образов, а также повышает качество идентификации объектов за счет снижения шумовой нагрузки путем исключения данных из соседних с идентифицируемыми объектами зон.

***Литература***

1. Cheyns E.,Daviron B. et al. The standardization of sustainable development through the insertion of agricultural global value chains into international markets // Sustainable Development and Tropical Agri-chains. Springer, Dordrecht, 2017. P. 283–303.
2. Tian H., Wang T., Liu Y. et al. Computer vision technology in agricultural automation — A review, Information Processing in Agriculture, https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006.

The results of the use of artificial intelligence in agriculture are given in many published works [1, 2].

This paper presents the results of the elaboration of an intelligence system of an agrotechnical complex capable to perform the following functions:

1) data collection and analysis of the mineral and biological composition, humidity, temperature, and electrical conductivity of soil;
2) collection and analysis of data on crop growth and diseases;
3) application of fertilizers and preparations;
4) removal of weeds.

The model of the complex is characterized by the following parameters:

- databases of two crops;
- identification of evidences of four diseases of the cultivated crops.

The data received from lidars and high-speed cameras are processed in the discussed system by distributed algorithms for CUDA processors, using functions of the Open CV 4 computer vision libraries. A flow diagram of artificial intelligence modules is used in the elaborated system. The algorithms of merging, subtraction, and final differentiation of images compose the resulting polygonal model. The algorithm for rejecting image segments provides data for the calculation, using a neural network.

This enables the improvement of the identification and the increase in the training speed of U-net networks during deep learning, using TensorFlow libraries, by the automatic rejection of images and their segments. The quality of object identification is improved by reducing noise load as a result of excluding data from the areas adjacent to the identified objects.

***References***

1. Cheyns E., Daviron B. et al. The standardization of sustainable development through the insertion of agricultural global value chains into international markets// Sustainable Development and Tropical Agri-chains. Springer, Dordrecht, 2017. P. 283–303.
2. Tian H., Wang T., Liu Y. et al. Computer vision technology in agricultural automation // A review, Information Processing in Agriculture, https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006.

УДК 537.622 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.652.654

# Доменные границы и скирмионы как элементы нейроморфных устройств

## Domain Walls and Skyrmions as Elements of Neuromorphic Devices

**Логунов М. В.[1], Никитов С. А.[1,2]**
*[1] Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН*
*125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7*
*logunov@cplire.ru*
*[2] Московский физико-технический институт (ГУ)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Logunov M. V.[1], Nikitov S. A.[1,2]**
*[1] Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS*
*11/7 Mokhovaya St., Moscow, 125009, Russia*
*logunov@cplire.ru*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia*

Представлен обзор состояния исследований и разработок элементов нейроморфных устройств на базе подвижных нанообъектов спинтроники — доменных границ и скирмионов.
**Ключевые слова:** доменные границы; скирмионы; нейроморфные устройства.

The paper presents a review of the research and development of neuromorphic devices based on mobile spintronics nanoobjects — domain walls and skyrmions.
**Keywords:** domain walls; skyrmions; neuromorphic devices.

Доменные границы и скирмионы в магнитных пленках являются объектами, размеры которых измеряются десятками и даже единицами нанометров (предельный размер скирмионов — 1 нм). Такие объекты представляют особый интерес для разработки логических и запоминающих устройств, поскольку их положением и свойствами можно управлять с помощью различных воздействий — магнитного поля, импульсов тока, лазерных импульсов [1–5]. В данном обзоре рассмотрены состояние исследований и перспективы применения доменных границ и скирмионов в нейроморфных устройствах спинтроники благодаря возможности реализации с их помощью линейных и программируемых нелинейных функций. Отметим наиболее привлекательные свойства нейроморфных устройств спинтроники на базе доменных границ и скирмионов: энергонезависимость синаптических устройств, возможность интеграции функций многоразрядной памяти и вычислений, интеграция функций нейрона и синапса в одном наноэлектронном устройстве; энергопотребление таких устройств прогнозируется на уровне энергопотребления нейронов головного мозга. В доклад включены также результаты исследований доменных границ и скирмионов, проводимых в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (см. [3–5] и др.): формирование скирмионов в тонких металлических пленках; движение доменных границ под действием лазерных импульсов; сверхбыстрая динамика доменных границ в окрестности точки компенсации углового момента ферримагнетика.

***Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 18-29-27020, 18-52-16006) и гранта правительства РФ (проект № 2019-220-07-9114).***

***Литература***

1. Grollier J., Querlioz D., Camsari K.Y., Everschor-Sitte K., Fukami S. et al. Neuromorphic spintronics // Nature Electronics, 2020. V. 3. P. 360–370.
2. Sbiaa R. Multistate Magnetic Domain Wall Devices for Neuromorphic Computing // Phys. Stat. Sol. RRL, 2021. V. 15. P. 2100125.
3. Никитов С.А., Сафин А.Р., Калябин Д.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н. и др. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // Успехи физических наук, 2020. — Т. 190. — С. 1009–1040.
4. Gerasimov M.V., Logunov M.V., Spirin A.V., Nozdrin Yu.N., Tokman I.D. Time evolution of domain-wall motion induced by nanosecond laser pulses // Phys. Rev. B, 2016. V. 94. P. 014434.
5. Logunov M.V., Safonov S.S., Fedorov A.S., Danilova A.A., Moiseev N.V. et al. Domain wall motion across magnetic and spin compensation points in magnetic garnets // Phys. Rev. Applied, 2021. V. 15. P. 064024.

Domain walls and skyrmions in magnetic films are objects whose dimensions are measured in tens or even several of nanometers (the limit size of skyrmions is 1 nm). Such objects are of particular interest for the development of logic and storage devices, since their position and properties can be controlled using various actions — magnetic field, current pulses, laser pulses [1–5]. The state of research and prospects for the use of domain walls and skyrmions in neuromorphic spitronics devices due to the possibility of implementing linear and programmable nonlinear functions has been discussed in this review. We note the most attractive properties of neuromorphic spitronics devices based on domain walls and skyrmions: the non-volatility of synaptic devices; the possibility of integrating multi-bit memory and computing functions, the integration of neuron and synapse functions in one nanoelectronic device; the energy consumption of such devices is predicted at the level of energy consumption of brain neurons. The report also includes the results of studies of domain walls and skyrmions conducted at the V.A. Kotelnikov IRE RAS (see [3–5] and others): the formation of skyrmions in thin metal films; the movement of domain walls under the action of laser pulses; ultrafast dynamics of domain walls in the vicinity of the angular momentum compensation point of a ferrimagnet.

***The results presented in this review were obtained with the support of Russian Foundation for Basic Research (Projects № 18-29-27020 and № 18-52-16006), and a grant from the Government of the Russian Federation (Project № 075-15-2019-1874).***

***References***

1. Grollier J., Querlioz D., Camsari K.Y., Everschor-Sitte K., Fukami S. et al. Neuromorphic spintronics // Nature Electronics, 2020. V. 3. P. 360–370.
2. Sbiaa R. Multistate Magnetic Domain Wall Devices for Neuromorphic Computing // Phys. Stat. Sol. RRL, 2021. V. 15. P. 2100125.
3. Nikitov S.A., Safin A.R., Kalyabin D.V., Sadovnikov A.V., Beginin E.N. et al. Dielectric magnonics — from gigahertz to terahertz // Phys. Usp., 2020. V. 190. P. 945–974.

4. Gerasimov M.V., Logunov M.V., Spirin A.V., Nozdrin Yu.N., Tokman I.D. Time evolution of domain-wall motion induced by nanosecond laser pulses // Phys. Rev. B, 2016. V. 94. P. 014434.
5. Logunov M.V., Safonov S.S., Fedorov A.S., Danilova A.A., Moiseev N.V. et al. Domain wall motion across magnetic and spin compensation points in magnetic garnets // Phys. Rev. Applied, 2021. V. 15. P. 064024.

УДК 004.9 + 004.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.655.656

# Нейроморфные системы на базе концепции многомерного мозга и мемристивных устройств

## Neuromorphic Systems Based on High-dimensional Brain Concept and Memristive Devices

**Щаников С. А.[1,2], Лобов С. А.[2,3,4], Михайлов А. Н.[2], Казанцев В. Б.[2,3,4], Макаров В. А.[2,5]**

*[1] Муромский институт Владимирского государственного университета*
*602264, г. Муром, ул. Орловская, 23*
*seach@inbox.ru*
*[2] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*
*603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23*
*[3] Университет «Иннополис»*
*420500, г. Иннополис, ул. Университетская, 1*
*[4] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*
*603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23*
*[5] Мадридский университет Комплутенсе*
*28040, Испания, г. Мадрид, блв. Комплютенсе*

**Shchanikov S. A., Lobov S. A., Mikhaylov A. N., Kazantsev V. B., Makarov V. A.**

Предложен новый подход к созданию энергоэффективных нейроморфных систем на основе многомерных нейронов с синапсами на основе мемристивных устройств. Такие системы могут имитировать функции пространственной памяти гиппокампа и предназначены для решения сложно формализуемых задач искусственного интеллекта.
**Ключевые слова:** искусственный интеллект; многомерный мозг; мемристивные устройства; нейроморфные вычисления; нейронные сети.

We have proposed a novel approach to building energy-efficient neuromorphic systems based on high-dimensional neurons with memristive devices simulating synaptic connections. Such systems can imitate functions of the spatial memory of the hippocampus and solve complex tasks of artificial intelligence.
**Keywords:** artificial intelligence; high-dimensional brain; memristive devices; neuromorphic computing; neural networks.

Предложен новый перспективный вариант создания нейроморфных систем, объединяющий в себе возможности концепции многомерного мозга, в основе которой лежит эффект «благословения размерности», и преимущества мемристивных устройств, пластичность которых базируется на явлении резистивного переключения. Ранее [1] было показано, что ансамбли динамически простых, но многомерных нейронов могут эффективно решать существенно многомерные задачи, которые часто не поддаются решению стандартными методами. В данной работе впервые показано, что математическая модель многомерного нейрона может быть реализована непосредственно в виде электронного устройства, что по сравнению с программной эмуляцией позволит значительно повысить скорость обработки больших данных и снизить энергозатраты. Это стало возможным благодаря интенсивному

развитию технологии создания мемристивных материалов и устройств, имитирующих синаптическую пластичность, и предложенной методологии системной инженерии, адаптированной для данного класса устройств. Синтез вышеназванных технологий продемонстрирован в докладе на примере задачи классификации, выполняемой нейроморфной системой, построенной в соответствии с концепцией аналогового машинного зрения. Предварительные результаты подтверждают перспективность предлагаемого подхода, позволяют сформулировать новые направления исследований и выявить принципиальные ограничения для разрабатываемого класса устройств.

***Различные части работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (проекты №№ 21-11-00280, 21-12-00246, 21-71-00136) и Правительства Российской Федерации (грант для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых № 074-02-2018-330(2)).***

***Литература***

1. Tyukin I. et al. High-dimensional brain: A tool for encoding and rapid learning of memories by single neurons // Bulletin of mathematical biology, 2019. V. 81. № 11. P. 4856–4888.

A new promising approach for creating neuromorphic systems has been proposed that combines the capabilities of the high-dimensional brain concept based on the phenomenon of "blessing of dimension" and the advantages of memristive devices, whose plasticity is based on the phenomenon of resistive switching. Earlier [1], it was shown that assemblies of dynamically simple but high-dimensional neurons can effectively solve essentially high-dimensional problems that often defy treatment with standard methods. In this work, it has been shown for the first time that a mathematical model of the high-dimensional neuron can be implemented directly in the form of an electronic device, which, in comparison with software emulation, will significantly increase the speed of processing big data and reduce energy consumption. This becomes possible due to the intensive maturity of technology for creating memristive materials and devices that emulate synaptic plasticity, together with the proposed system engineering methodology adapted for this class of devices. The synthesis of the above technologies has been demonstrated in the report on the example of a classification task performed by a neuromorphic system built in accordance with the concept of analog machine vision. The preliminary results have confirmed the promising nature of the proposed approach, make it possible to formulate new research tasks and reveal fundamental limitations for the class of devices under development.

***Different parts of this work were supported by Russian Science Foundation (projects № 21-11-00280, 21-12-00246, 21-71-00136) and the Government of the Russian Federation (grant for state support of scientific research conducted under the guidance of leading scientists № 074-02-2018-330(2)).***

***References***

1. Tyukin I. et al. High-dimensional brain: A tool for encoding and rapid learning of memories by single neurons // Bulletin of mathematical biology, 2019. V. 81. № 11. P. 4856–4888.

УДК 621.38-022.532 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.657.658

# Мемристивные устройства для систем информационной безопасности

## Memristive Devices for Information Security Systems

**Михайлов А. Н.[1], Королев Д. С.[1], Белов А. И.[1], Гусейнов Д. В.[1], Шамшин М. О.[1], Шарапов А. Н.[1], Лукоянов В. И.[1], Першин Ю. В.[2]**
*[1] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*
*603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23*
*mian@nifti.unn.ru*
*[2] Университет Южной Каролины*
*Колумбия, Южная Каролина 29208, США*

**Mikhaylov A. N.[1], Korolev D. S.[1], Belov A. I.[1], Guseinov D. V.[1], Shamshin M. O.[1], Sharapov A. N.[1], Lukoyanov V. I.[1], Pershin Y. V.[2]**
*[1] Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*
*23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*
*mian@nifti.unn.ru*
*[2] University of South Carolina*
*Columbia, SC 29208 USA*

Рассмотрены основные подходы к использованию мемристивных систем в качестве аппаратных средств криптографической защиты в системах информационной безопасности. Представлены результаты разработки прототипа аппаратного генератора случайных чисел на основе схемы из резисторов и мемристивных устройств.
**Ключевые слова:** мемристор; стохастическое резистивное переключение; генератор истинно случайных чисел; статистические тесты.

The paper considers main approaches to the use of memristive systems as cryptographic protection hardware of information security systems. Besides it presents the results of the development of a prototype of a hardware random number generator based on a circuit of resistors and memristive devices.
**Keywords:** memristor; stochastic resistive switching; true random number generator; statistical tests.

Бурное развитие информационных технологий и новые угрозы для информационной безопасности (ИБ) делают насущной проблему создания компактных аппаратных систем безопасности, которые не уступают программным системам в эффективности, но при этом являются гораздо более защищенными. Мемристивные устройства на основе технологически отработанных и КМОП-совместимых структур «металл — оксид — металл» рассматриваются в качестве новой элементной базы информационно-вычислительных систем. Ярко выраженный стохастический характер резистивного переключения в таких структурах обычно считается недостатком при построении традиционных вычислительных систем на основе мемристивных устройств, однако может быть естественным образом использован в качестве источника энтропии в криптографических системах ИБ. В данном докладе рассмотрены основные подходы к созданию генераторов истинно случайных чисел

(ГИСЧ) на основе разброса различных параметров резистивного переключения и флуктуаций тока, протекающего через мемристор. По нашему мнению, наиболее перспективный для практического применения вариант ГИСЧ может быть основан на комбинациях резисторов и мемристивных устройств, состояние которых после переключения является источником истинно случайных чисел. Данный подход апробирован экспериментально и теоретически на основе простой вероятностной модели, учитывающей экспериментально определенные параметры резистивного переключения. Изготовлена экспериментальная схема ГИСЧ, пригодная для проведения статистических тестов и решения криптографических задач современных систем ИБ.

***Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (договор № 074-02-2018-330 (2)) и в рамках гранта Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники (договор № 316-06-16-24/20).***

The rapid development of information technologies and new threats to information security (IS) make it urgent to create compact hardware security systems that are not inferior to software systems in efficiency, but are much more secure. Memristive devices based on technologically mature and CMOS-compatible “metal-oxide-metal” structures are considered as a new element base of information and computing systems. The pronounced stochastic nature of resistive switching in such structures is usually considered a disadvantage when building traditional computing systems based on memristive devices, but it can be naturally used as a source of entropy in cryptographic IS systems. Here we report the main approaches to the creation of true random number generators (TRNG) based on the variation of various parameters of resistive switching and fluctuations of the current flowing through the memristor. In our opinion, the most promising version of the TRNG for practical application can be based on combinations of resistors and memristive devices, the state of latter after switching being a source of true random numbers. This approach has been tested experimentally and theoretically using a simple probabilistic model that takes into account the experimentally determined parameters of resistive switching. An experimental TRNG circuit has been fabricated that is suitable for carrying out statistical tests and solving cryptographic problems of modern IS systems.

***This work was supported by the Government of the Russian Federation (agreement № 074-02-2018-330 (2)) and through the science, technology and engineering grant of Nizhny Novgorod region (agreement № 316-06-16-24/20).***

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.659.661

# Широкополосные нейроморфные фотосенсоры на основе фотомемристивных низкоразмерных кристаллов и Ван-дер-Ваальсовых гетероструктур

## Broadband Neuromorphic Photosensors Based on Photomemristive Low-dimensional Crystals and Van der Waals Heterostructures

**Панин Г. Н.**
*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*
*panin@iptm.ru*

**Panin G. N.**
*Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia*
*panin@iptm.ru*

Рассмотрены фотомемристорные нульмерные и двумерные структуры на основе графена, оксида графена, дисульфида молибдена и Ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры из низкоразмерных слоевых материалов для создания нейроморфных фотосенсоров, чувствительных в широком диапазоне электромагнитного излучения.
**Ключевые слова:** фотомемристоры; нейроморфные фотосенсоры; графен; дисульфид молибдена; 2D-кристаллы; квантовые точки; Ван-дер-Ваальсовые гетероструктуры; фотоиндуцированные фазовые переходы.

The paper highlights photomemristor zero-dimensional and two-dimensional structures based on graphene, graphene oxide, molybdenum disulfide and van der Waals heterostructures made of low-dimensional layered materials for the creation of neuromorphic photosensors sensitive in a wide range of electromagnetic radiation.
**Keywords:** photomemristors; neuromorphic photosensors; graphene; molybdenum disulfide; 2D crystals; quantum dots; Van der Waals heterostructures; photoinduced phase transitions.

В последние годы вызывает повышенный интерес создание оптоэлектронных компонентов на основе фотомемристорных устройств, способных энергоэффективно хранить и обрабатывать данные и детектируемые сигналы, имитируя функции нейронов и синапсов [1]. Фотомемристорные структуры, изготовленные из слоевых низкоразмерных материалов [2–8], эффективно поглощают излучение в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и терагерцевом диапазонах. В докладе рассмотрены фотомемристорные нульмерные и двумерные структуры на основе графена, оксида графена, дисульфида молибдена и Ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры из низкоразмерных слоевых материалов для создания нейроморфных фотосенсоров, чувствительных в широком диапазоне электромагнитного излучения. Приведены результаты исследований фоточувствительных слоевых устройств с квантовыми точками, которые контролируются сверхбыстрыми фотоиндуцированными обратимыми переходами полупроводник — металл. Такие переходы, наведенные

изменением заряда и температуры, могут приводить к настраиваемым периодическим колебаниям двух переменных состояний и контролируемому динамическому поведению, аналогичному в биологических сенсорных системах. Рассмотрены возможности использования оптоэлектронной платформы для нейроморфной обработки сигнала и распознавания изображений, а также совместимость формирования нейроморфных слоистых фотосенсоров с КМОП-технологией.

***Литература***


1. Panin G. N. Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals // Chaos, Solitons and Fractals, 2021. V. 142. P. 110523. DOI:10.1016/j.chaos.2020.110523.
2. Panin G. N. and Kapitanova O. O. Memristive Systems Based on Two-Dimensional Materials // Advances in Memristor Neural Networks — Modeling and Applications, Calin Ciufudean, IntechOpen, 2018.
3. Wang W. et al. $MoS_2$ memristor with photoresistive switching // Sci. Rep., 2016. V. 6. P. 31224.
4. Kapitanova O. O. et al. Direct patterning of reduced graphene oxide/graphene oxide memristive heterostructures by electron-beam irradiation // J. Mater. Sci. Technol., 2020. V. 38. P. 237.
5. Kovaleva N. N. et al. Efficient Green Emission from Edge States in Graphene Perforated by Nitrogen Plasma Treatment // 2D Mater., 2019. V. 6. P. 045021.
6. Fu Xiao et al. Tunable UV-visible absorption of $SnS_2$ layered quantum dots produced by liquid phase exfoliation // Nanoscale, 2017. V. 9. № 5. P. 1820.
7. Панин Г. Н. Оптоэлектронные мемристоры на основе двумерных кристаллов для нейронных сетей // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13 — № S5-3 (102). — С. 704—717. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.704.717.
8. Fu X. et al. Molybdenum Disulfide Nanosheet/Quantum Dot Dynamic Memristive Structure Driven by Photoinduced Phase Transition // Small, 2019. P. 1903809.


***Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-29-03050, и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00920-20-00.***

In recent years, there has been an increased interest in the creation of optoelectronic components based on photomemristor devices capable of energy efficient storage and processing of data and detected signals, simulating the functions of neurons and synapses [1]. Photomemristor structures made of low-dimensional layered materials [2—8] effectively absorb radiation in the ultraviolet, visible, infrared and terahertz ranges. The report considers photomemristor zero-dimensional and two-dimensional structures based on graphene, graphene oxide, molybdenum disulfide and van der Waals heterostructures from low-dimensional layered materials for the creation of neuromorphic photosensors sensitive in a wide range of electromagnetic radiation. The results of studies of photosensitive layered devices with quantum dots, which are controlled by ultrafast photoinduced reversible semiconductor-metal transitions, have been presented. Such transitions, induced by changes in charge and temperature, can lead to tunable periodic oscillations of two state variables and controlled dynamic behavior similar to biological sensory systems. The report presents possibilities of using an optoelectronic platform for neuromorphic signal processing and image

recognition, as well as the compatibility of the formation of neuromorphic layered photosensors with CMOS technology.

***References***


1. Panin G. N. Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals // Chaos, Solitons and Fractals, 2021. V. 142. P. 110523. DOI:10.1016/j.chaos.2020.110523.
2. Panin G. N. and Kapitanova O. O. Memristive Systems Based on Two-Dimensional Materials // Advances in Memristor Neural Networks — Modeling and Applications, Calin Ciufudean, IntechOpen, 2018.
3. Wang W. et al. $MoS_2$ memristor with photoresistive switching // Sci Rep, 2016. V. 6. P. 31224.
4. Kapitanova O. O. et al. Direct patterning of reduced graphene oxide/graphene oxide memristive heterostructures by electron-beam irradiation // J. Mater. Sci. Technol., 2020. V. 38. P. 237.
5. Kovaleva N. N. et al. Efficient Green Emission from Edge States in Graphene Perforated by Nitrogen Plasma Treatment // 2D Mater, 2019. V. 6. P. 045021.
6. Fu Xiao et al. Tunable UV-visible absorption of $SnS_2$ layered quantum dots produced by liquid phase exfoliation // Nanoscale, 2017. V. 9. № 5. P. 1820.
7. Panin G. N. Optoelectronic memristors based on two-dimensional crystals for neural networks / Nanoindustry, 2020. V. 13. № S5-3 (102). P. 704–717. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.704.717.
8. Fu X. et al. Molybdenum Disulfide Nanosheet/Quantum Dot Dynamic Memristive Structure Driven by Photoinduced Phase Transition // Small, 2019. P. 1903809.


***This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant № 19-29-03050, and State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00920-20-00.***

УДК 53.06 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.662.663

# Теоретические и экспериментальные исследования элементов энергонезависимой многоуровневой памяти для нейроморфных систем

## Theoretical and Experimental Study of Multilevel Non-Volatile Memory for Neuromorphic Applications

**Ковешников С. В.[1], Федотов М. И.[2]**
*[1] ИПТМ РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*
*[2] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Koveshnikov S. V.[1], Fedotov M. I.[2]**
*[1] IMT RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432*
*[2] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В работе проведено детальное экспериментальное исследование процессов переключения в элементе многоуровневой памяти RRAM на основе оксида гафния. Сформулирована и доказана гипотеза множественности проводящих филаментов. Предложен способ создания в ячейке памяти единственного проводящего филамента.
**Ключевые слова:** RRAM; оксид гафния; характеристики переключения; невоспроизводимость параметров переключения.

The paper presents detailed experimental study of intrinsic variability in HfOx-based RRAM, statistical analysis of key switching parameters variability, and analytical model of resistive switching that explains the obtained experimental data. The core of the model is the assumption that multiple conductive filaments could be formed in the same RRAM cell. Additionally, a method of creating a singular and precisely positioned conductive filament has been proposed.
**Keywords:** RRAM; hafnium oxide; switching characteristics; cycle-to-cycle variability.

Невоспроизводимость параметров переключения является ключевой проблемой RRAM, препятствующей достижению надежного многоуровневого переключения, необходимого для повышения плотности записи информации в массивах RRAM и их применения в нейроморфных вычислениях. Предположительно связано это с наличием нескольких проводящих филаментов, число и влияние которых на проводимость в ячейке могут меняться от цикла к циклу.

Было проведено экспериментальное исследование невоспроизводимости параметров переключения в ячейке RRAM на основе оксида гафния: напряжения переключения и сопротивлений в низко- и высокоомном состояниях. Определен ряд зависимостей параметров переключения от условий проведения эксперимента — ограничений тока и напряжения.

Для объяснения результатов эксперимента была разработана аналитическая модель резистивного переключения, основанная на предположении, что в ячейке

памяти может одновременно образовываться несколько проводящих филаментов. Проведено моделирование разброса сопротивления в низко- и высокоомном состояниях. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает гипотезу многих филаментов.

На основе технологий ИПТМ РАН предложен способ создания единственного и строго позиционированного проводящего филамента, основанный на локальном (на площади в несколько нанометров) внедрении в диэлектрик заряженных дефектов с помощью электронного пучка. Внедренный заряд создает локальную неоднородность электрического поля в ячейке, что способствует росту единственного проводящего филамента, а также снижает энергопотребление ячейки RRAM.

***Литература***

1. Fantini A., Goux L., Degraeve R., Wouters D.J., Raghavan N., Kar G., Belmonte A., Chen Y.-Y., Govoreanu B., Jurczak M. Intrinsic switching variability in HfO2 RRAM. International Memory Workshop IMW, 2013. P. 30–33.
2. Ambrogio S., Balatti S., Cubeta A., Calderoni A., Ramaswamy N. and Ielmini D. Statistical Fluctuations in HfOx Resistive-Switching Memory: Part I — Set/Reset Variability // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 61. № 8. P. 2912–2919, August 2014.
3. Sowinska M., Bertaud T., Walczyk D., Thiess S., Schubert M., Lukosius M., Drube W., Walczyk C. and Schroeder T. Hard x-ray photoelectron spectroscopy study of the electroforming in Ti/HfO2-based resistive switching structures // Applied Physics Letters, 2012. Vol. 100. № 23.
4. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.

УДК 621.38-022.532 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.664.665

# Мемристорные структуры на основе электрохимического оксида титана для ReRAM и нейроморфных применений

## Memristor Structures Based on Electrochemical Titanium Oxide for ReRAM and Neuromorphic Applications

**Смирнов В. А.[1], Авилов В. И.[1], Томинов Р. В.[1], Федотов А. А.[1], Агеев О. А.[1], Валов И.[2]**
*[1] Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет*
*347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2*
*[2] Институт Петера Грюнберга Юлихского исследовательского центра*
*52428, Германия, г. Юлих, Wilhelm-Johnen-Str.*
*vasmirnov@sfedu.ru*

**Smirnov V. A.[1], Avilov V. I.[1], Tominov R. V.[1], Fedotov A. A.[1], Ageev O. A.[1], Valov I.[2]**
*[1] Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering, Southern Federal University*
*2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russia*
*[2] Peter Grünberg Institute, Forschungszentrum Jülich GmbH*
*Wilhelm-Johnen-Str., Jülich, Germany, 52428*
*vasmirnov@sfedu.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния толщины наноструктур оксида титана, полученных локальным анодным окислением, на их мемристивные свойства. Показана возможность управляемого формирования мемристивных структур, не требующих формовки, имеющих напряжение переключения менее 3 В.
**Ключевые слова:** нанотехнологии; мемристор; ReRAM; нейроморфные системы; резистивное переключение; оксид титана; локальное анодное окисление.

In this work, we present the results of experimental studies of the influence of the thickness of nanoscale titanium oxide structures produced by local anodic oxidation on the memristive properties of such structures. We show that there is an opportunity for the controllable formation of forming-free memristive structures with switching voltages less than 3 V.
**Keywords:** Nanotechnology; memristor; ReRAM; neuromorphic systems; resistive switching; titanium oxide; local anodic oxidation.

В работе представлены экспериментальные исследования влияния геометрических параметров наноструктур оксида титана, полученных методом локального анодного окисления, на эффект резистивного переключения. Показано, что увеличение амплитуды напряжения локального анодного окисления от 6 до 9 В приводит к увеличению толщины (h) и высоты (h1) от 4,5±0,7 нм до 7,9±0,3 нм и от 1,9±0,4 нм до 3,9±0,1 нм. Анализ вольт-амперных характеристик полученных наноструктур титана показал, что локальное анодное окисление позволяет управляемо создавать мемристорные наноструктуры оксида титана с напряжениями переключения менее 3 В. Показано, что с увеличением толщины наноструктуры оксида

титана от 4,5±0,7 нм до 7,9±0,3 нм отношение сопротивлений $R_{HRS}/R_{LRS}$ уменьшается от 242,8 до 10,6.

Экспериментальные результаты эффекта резистивного переключения в наноструктуре оксида титана с использованием токовой АСМ показали, что увеличение напряжения $U_{set}$ от 3 до 7 В приводит к увеличению тока и диаметра областей с низким сопротивлением от 0,6 до 2,4 нА и от 157 до 176 нм соответственно. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и разработке технологических процессов изготовления мемристивных структур для использования в устройствах памяти ReRAM нового поколения и нейроморфных системах.

***Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-29-03041 мк и гранта Президента Российской федерации № МК-767.2020.8.***

This work presents experimental studies of the effect of geometric parameters of nanoscale titanium oxide structures created by local anodic oxidation on the resistive switching of it. An increase in the local anodic oxidation amplitude voltage from 6 to 9 V was shown to lead to an increase in the thickness and height above the surface from 4.5±0,7 nm to 7.9±0,3 nm and from 1.9±0,4 nm to 3.9±0,1 nm. The analysis of the I-V characteristics showed that the nanoscale titanium oxide structure obtained by means of local anodic oxidation showed a bipolar resistive switching between HRS and LRS states without any additional electroforming steps. Local anodic oxidation was shown to provide an opportunity for the controllable creation of memristive titanium oxide nanostructures with switching voltages of less than 3 V. It was shown that with an increase in the thickness of the titanium oxide nanostructure from 4.5±0,7 nm to 7.9±0,3 nm, the $R_{HRS}/R_{LRS}$ ratio decreases from 242.8 to 10.6.

The experimental results of the resistive switching effect in nanoscale titanium oxide structure using a CAFM showed that an increase in the Uset voltage from 3 to 7 leads to an increase in the current and diameter of the LRS spots from 0.6 to 2,4 nA and from 157 to 176 nm, respectively. The results can be used in the design and development of technological processes for the manufacture of memristive structures to be used in new generation ReRAM memory devices and neuromorphic systems.

***The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research according to the research project № 19-29-03041_mk and by the grant of the President of the Russian Federation № MK-767.2020.8.***

УДК 539.231 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.666.668

# Лазерный синтез тонких пленок оксидов ниобия и тантала и мемристоров на их основе

## Laser Synthesis of Thin Films of Niobium and Tantalum Oxides and Memristors Based on Them

**Новодворский О. А., Храмова О. Д., Паршина Л. С., Гусев Д. С., Михалевский В. А., Черебыло Е. А., Поляков А. С.**
*ИПЛИТ РАН, филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*
*140700, г. Шатура, ул. Святоозёрская, 1*
*onov@mail.ru*

**Novodvorsky O. A., Khramova O. D., Parshina L. S., Gusev D. S., Mikhalevsky V. A., Cherebylo E. A., Polyakov A. S.**
*ILIT RAS — branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS*
*1 Svyatoozerskaya St., Shatura, 140700*
*onov@mail.ru*

Методом лазерного синтеза из металлических мишеней при абляции излучением 248 и 532 нм получены тонкие пленки $NbO_x$ и $TaO_x$ в атмосфере кислорода и мемристоры на их основе в кроссбар-геометрии. В качестве электродов служили пленки Pt, Au, Ag, Ta, Nb. Изучено поведение ВАХ-мемристоров, полученных при разных условиях.
**Ключевые слова:** оксиды тантала; оксиды ниобия; тонкие пленки; мемристоры; PLD.

Thin films of $NbO_x$ and $TaO_x$ in an oxygen atmosphere and memristors based on them in crossbar geometry have been obtained by laser synthesis from metal targets ablation with 248 nm and 532 nm radiation. Films of Pt, Au, Ag, Ta, Nb served as electrodes. The behavior of the I–V characteristics of memristors obtained under different conditions has been studied.
**Keywords:** tantalum oxides; niobium oxides; thin films; memristors; PLD.

В последнее время активно исследуются мемристоры на основе пленок оксидов переходных металлов ниобия и тантала перспективных для применения в нейроморфных вычислениях и при создании резистивной оперативной памяти. Из металлических мишеней на подложках с-сапфира получены тонкие пленки $TaO_x$ для энергонезависимых и пленки $NbO_x$ для энергозависимых мемристоров методом импульсного лазерного осаждения. Ранее методом зонда Ленгмюра была установлена зависимость энергии частиц факела, осаждаемых на подложку, от плотности энергии лазерного излучения на мишени [1]. В настоящей работе пленки оксидов для мемристоров $Ta/TaO_x/Ta$ осаждались при абляции мишени излучением разных длин волн 248 и 532 нм. Пленки были исследованы методами рентгеновской дифракции и РФЭС. Мы установили зависимость поведения ВАХ мемристора в униполярном режиме сканирования напряжения от длины волны аблирующего излучения на мишени. Поведение ВАХ мемристора $Ta/TaO_x/Ta$, полученного при абляции излучением второй гармоники неодимового лазера 532 нм, идентично

отрицательной ветви ВАХ мемристора $Pt/TaO_x/TaO_y/Ta/c\text{-}Al_2O_3$, исследованного нами в работе [2].

Получены спектры пропускания пленок $TaO_x$ и $NbO_x$ в широком диапазоне давлений кислорода в напылительной камере при абляции излучением 248 и 532 нм. Пленки получали при комнатной температуре подложки и при 300°C. С использованием двух зондов исследовали ВАХ пленок $TaO_x$ и $NbO_x$ при униполярном и биполярном сканировании напряжения. В тонкопленочных структурах $Ta/TaO_x/Ta/c\text{-}Al_2O_3$ при измерениях ВАХ пленок $TaO_x$ выявлен энергонезависимый мемристивный эффект. Исследованы мемристивные свойства пленок $NbO_x$. В тонкопленочных структурах $Pt/NbO_x/Pt$ при измерениях ВАХ выявлен мемристивный эффект. Мемристоры $Pt/NbO_x/Pt/c\text{-}Al_2O_3$ и $Pt/NbO_x/Nb/c\text{-}Al_2O_3$, которые осаждались методом ИЛО в кроссбар-геометрии, демонстрировали энергозависимый характер при униполярном и биполярном циклах сканирования ВАХ. Проводили отжиг в вакууме и в атмосфере кислорода пленок $NbO_x$ мемристоров в кроссбар-геометрии. Проведено сравнение характеристик мемристоров на отожженных и неотожженных пленках $NbO_x$.

***Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» в части лазерного синтеза тонких пленок и мемристоров, гранту РФФИ № 19-29-03032 в части исследования тонких пленок и мемристоров.***

***Литература***

1. Novodvorsky O.A., Parshina L.S., Khramova O.D., Gusev D.S., Drovosekov A.B., Barkalova A.S., Mikhalevsky V.A., Cherebilo E.A., Rylkov V.V. Laser synthesis of thin $Mn_xSi_{1-x}$ films ($x \sim 0.5$) on *c*- and *r*-$Al_2O_3$ substrates at different laser energy densities at the target // Chaos, Solitons and Fractals, 2021. Vol. 142. P. 110457.
2. Liubov Parshina, Oleg Novodvorsky, Olga Khramova, Dmitriy Gusev, Alexander Polyakov, Vladimir Mikhalevsky, Elena Cherebilo. Laser synthesis of non-volatile memristor structures based on tantalum oxide thin films // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 142. P. 110460.

Recently, memristors based on films of transition metal oxides niobium and tantalum, which are promising for use in neuromorphic calculations and in the creation of resistive random access memory, have been actively studied. Thin $TaO_x$ films for nonvolatile and $NbO_x$ films for volatile memristors were obtained from metal targets on c-sapphire substrates by pulsed laser deposition. Earlier, the Langmuir probe method was used to establish the dependence of the energy of the torch particles deposited on the substrate on the energy density of laser radiation on the target [1]. In this work, oxide films for $Ta/TaO_x/Ta$ memristors were deposited by ablation of the target by radiation of different wavelengths of 248 nm and 532 nm. The films were studied by X-ray diffraction and XPS. We have established the dependence of the behavior of the I–V characteristic of a memristor in the unipolar voltage scanning mode on the wavelength of ablating radiation on the target. The behavior of the I–V characteristic of the $Ta/TaO_x/Ta$ memristor obtained by ablation by the second harmonic of a 532 nm neodymium laser is identical to the negative branch of the I–V characteristic of the $Pt/TaO_x/TaO_y/Ta/c\text{-}Al_2O_3$ memristor studied by us in [2].

Transmission spectra of $TaO_x$ and $NbO_x$ films were obtained in a wide range of oxygen pressures in a deposition chamber under ablation with 248 nm and 532 nm radiation. Films were obtained at room temperature of the substrate and at 300 °C. Using two probes, the I–V characteristics of the $TaO_x$ and $NbO_x$ films were studied with unipolar and bipolar voltage scanning. In thin-film structures $Ta/TaO_x/Ta/c\text{-}Al_2O_3$, measurements of the I–V characteristics of $TaO_x$ films revealed a nonvolatile memristive effect. The memristive properties of $NbO_x$ films have been investigated. In the $Pt/NbO_x/Pt$ thin-film structures, the memristive effect was revealed during the measurements of the I–V characteristics. Memristors $Pt/NbO_x/Pt/c\text{-}Al_2O_3$ and $Pt/NbO_x/Nb/c\text{-}Al_2O_3$, which were deposited by PLD in a crossbar geometry, demonstrated an energy-dependent character during unipolar and bipolar I–V characteristic scanning cycles. Annealing of $NbO_x$ memristor films in a crossbar geometry was carried out in vacuum and in an oxygen atmosphere. The characteristics of memristors on annealed and unannealed $NbO_x$ films are compared.

***This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the State Order of the Federal Research Center "Crystallography and Photonics" in the part of "laser synthesis of thin films and memristors", RFBR grants № 19-29-03032 in the part of "research of thin films and memristors".***

***References***

1. Novodvorsky O. A., Parshina L. S., Khramova O. D., Gusev D. S., Drovosekov A. B., Barkalova A. S., Mikhalevsky V. A., Cherebilo E. A., Rylkov V. V. Laser synthesis of thin $Mn_xSi_{1-x}$ films (x ~ 0.5) on *c*- and *r*-$Al_2O_3$ substrates at different laser energy densities at the target // Chaos, Solitons and Fractals, 2021. Vol. 142. P. 110457.
2. Liubov Parshina, Oleg Novodvorsky, Olga Khramova, Dmitriy Gusev, Alexander Polyakov, Vladimir Mikhalevsky, Elena Cherebilo. Laser synthesis of non-volatile memristor structures based on tantalum oxide thin films // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 142. P. 110460.

УДК 544.344.015.4 + 620.181 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.669.670

# Фазоизменяемые материалы для нейроморфных приложений

## Phase-changing Materials for Neuromorphic Applications

**Ионин В. В., Киселев А. В., Бурцев А. А., Елисеев Н. Н., Михалевский В. А., Лотин А. А.**
*ИПЛИТ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*
*140700, г. Шатура, ул. Святоозёрская, 1*

**Ionin V. V., Kiselev A. V., Burtsev A. A., Yeliseyev N. N., Mikhalevskiy V. A., Lotin A. A.**
*ILIT RAS — branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS*
*1 Svyatoozerskaya St., Shatura, 140700*

В работе рассмотрены исследования управляемого многоуровневого переключения на основе сильного контраста оптических свойств для разных фаз некоторых халькогенидных материалов. Приведенные результаты позволяют создать полностью оптические волноводные и нейроморфные устройства и системы на их базе.

**Ключевые слова:** оптические вычисления; фазоизменяемые материалы; халькогениды; лазерно-инициированные фазовые переходы; нейроморфные системы.

Халькогенидные материалы, такие как GeTe, Ge-Sb-Te, Ge-Sb-Se-Te и их производные с различным стехиометрическим соотношением, широко используются в области создания модулей энергонезависимой памяти, оптических дисках высокой плотности информации и оптоэлектронных устройствах, поскольку их физические свойства существенно различаются для двух стабильных фазовых состояний — кристаллического и аморфного [1]. Ранее был продемонстрирован высокий оптический контраст в спектральном диапазоне от 200 до 22000 нм и большая разница в электропроводности между аморфным и кристаллическим состояниями [2].

В данной работе экспериментально демонстрируется многоуровневое обратимое изменение оптических свойств тонкопленочных образцов, связанное с фазовыми переходами под воздействием импульсного лазерного излучения. Ячейка на основе тонких пленок халькогенидов может хранить несколько состояний, которые соответствуют разному соотношению аморфной и кристаллической фаз [3, 4]. Переключение между множественными состояниями контролировалось излучением импульсного лазера (532 нм, 20 нс) различной плотности энергии в схеме «накачка — зонд», ранее реализованной в [5]. Численная модель, основанная на уравнении теплопроводности в твердом теле и классической задаче Стефана, использовалась для предсказания соотношения аморфного и кристаллического фазовых состояний.

Данное исследование предлагает перспективный путь создания новых устройств на основе тонких пленок халькогенидов, таких как многоуровневая память с фазовым переходом, оптические логические элементы и их массивы, не содержащие электрических связей, биоподобные оптико-электронные устройства, в том числе синапс-подобные нейроморфные устройства и системы. Ячейки многоуровневых состояний на основе халькогенидных сплавов обладают рядом

принципиальных свойств, таких как предпороговый режим накопления энергии, пороговое значение энергии перехода и нелинейное поведение при переключении состояний, что позволяет рассматривать работу как аналоги биологического нейрона [6]. Поскольку соотношение фаз контролируется оптическими методами (одновременно измеряются коэффициенты пропускания и отражения), приведенный метод позволяет достичь более высокой точности и стабильности всех программируемых состояний по сравнению с контролем электрофизическими методами (через удельную проводимость или сопротивление) [7].

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта № 075-15-2019-1950 в части синтеза образцов GST, государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН № 075-00486-21-00 в части исследования их структурных свойств, а также гранта РФФИ № 19-29-12024 в части изучения динамики изменения оптических свойств образцов.***

***Литература***

1. Ovshinsky S. R., Phys. Rev. Lett., 21 (1968) 1450.
2. Eliseev N. N., Kiselev A. V., Ionin V. V., Mikhalevsky V. A., Burtsev A. A., Pankov M. A., Karimov D. N., Lotin A. A. Results in Physics, 19 (2020) 10346.
3. Papandreou N., Sebastian A., Pantazi A., Breitwisch M., Lam C., Pozidis H., Eleftheriou E. InternationalElectron Devices Meeting, 2011 3.5.1–3.5.4.
4. Wong H.-S. P., Raoux S., Kim S., Liang J., Reifenberg J. P., Rajendran B., Asheghi M. and Goodson K. E., Proc. IEEE, 98 (2010) 2201–2227.
5. Ionin V. V., Kiselev A. V., Eliseev N. N., Mikhalevsky V. A., Pankov M. A., Lotin A. A., Appl. Phys. Lett. 117 (2020) 011901.
6. Ovshinsky S. R., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43. № 7B, 2004. P. 4695–4699.
7. Raoux S., Wuttig M. (ed.). Phase Change Materials. Science and Applications. Springer Science+Business Media, 2009.

УДК 621.3.049.774 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.671.672

# Структуры «кремний на high-k-диэлектрике» нанометровой толщины

## Silicon on Nanometer-thick High-k Dielectric Structures

**Попов В. П.[1], д. ф.-м. н., Тихоненко Ф. В.[1], Гутаковский А. К.[1], к. ф.-м. н., Мяконьких А. В.[2], к. ф.-м. н., Руденко К. В.[2], д. ф.-м. н., Тысченко И. Е.[1], д. ф.-м. н.**

*[1] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*
*tys@isp.nsc.ru*
*[2] Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*

**Popov V. P.[1], Sc.D, Tikhonenko F. V.[1], Gutakovskii A. K.[1], Ph.D, Miakonkikh A. V.[2], Ph.D, Rudenko K. V.[2], Sc.D, Tyschenko I. E.[1], Sc.D**

*[1] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*
*tys@isp.nsc.ru*
*[2] Valiev Institute of Physics and Technology RAS*
*36/1 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218, Russia*

Разработаны физические основы технологии создания структур «кремний на изоляторе» с захороненным high-k-диэлектриком нанометровой толщины методом водородного переноса. Продемонстрированы возможности создания двухзатворных пьезоэлектрических транзисторов на основе созданных структур.

**Ключевые слова:** кремний на изоляторе; high-k-диэлектрик; наноструктуры.

Physical base of silicon-on-insulator technology of the structures with the nanometer-thick buried high-k dielectric has been developed. The possibilities of creating two-gate piezoelectric transistors based on the created structures have been demonstrated.

**Keywords:** silicon-on-insulator; high-k dielectric; nanostructures; pseudo FeFET.

Создание структур «кремний на изоляторе» (КНИ) с ультратонким захороненным high-k-диэлектриком обусловлено проблемами снижения рабочих напряжений на управляющих электродах МДП КНИ-транзисторов, а также задачами, связанными с интеграцией элементов сегнетоэлектрической памяти. При создании таких структур возникает целый ряд материаловедческих задач, решение которых позволит обеспечить высокое качество структур и расширить возможности их практического применения. В-первых, необходимо решить проблему устранения дефектов и остаточного водорода при создании КНИ-структур с ультратонким диэлектриком. Во-вторых, обеспечить высокую термическую стабильность ультратонких high-k-диэлектриков. В-третьих, обеспечить высокое качество границы раздела между кремнием и high-k-диэлектриком. В-четвертых, при использовании стеков различных high-k-диэлектриков необходимо добиться термостабильности сегнетоэлектрических свойств стеков high-k-диэлектриков. Целью данной работы является разработка основных физических подходов к созданию технологии

«кремний на изоляторе» с захороненным high-k-сегнетоэлектриком нанометровой толщины методом водородного переноса.

Изучена возможность геттерирования водорода и дефектов в КНИ-структурах с ультратонкими стеками high-k-диэлектриков с помощью имплантации в кремниевую подложку ионов $CO^+$, которые при последующем отжиге в решетке кремния создают устойчивые связи, не увеличивая шероховатость поверхности и не препятствуя процессу сращивания и водородного переноса слоя кремния. Имплантация ионов $CO^+$ позволила предотвратить формирование водородных пузырей в слое перенесенного кремния после отжига при температуре 1100 °С.

В целях увеличения термической стабильности захороненного диэлектрика, уменьшения токов утечки в КНИ-структурах и сохранения сегнетоэлектрических свойств было предложено использовать стеки, состоящие из различных high-k-диэлектриков нанометровой толщины, а также быстрые термические отжиги КНИ-структур.

Уменьшение плотности поверхностных состояний на границах раздела между слоями кремния и high-k-диэлектрика было достигнуто за счет использования азотирования поверхностей кремния перед осаждением high-k-диэлектриков и сращиванием пластин.

Предложенные технологические подходы позволили создать сегнетоэлектрические псевдо-МОП КНИ-транзисторы с ультратонким подзатворным диэлектриком, состоящим из набора слоев $HfO_2/Al_2O_3$, величина поляризации в которых сохраняется на уровне 11 мкКл/см$^2$ вплоть до температуры отжига 800 °С.

***Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-03031_мк).***

УДК 004.076.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.673.674

# Исследование зависимости электропроводности в мемристорах на основе селенида германия с самоформирующимся токопроводящим каналом при различных условиях работы

## Study of the Dependence of Electrical Conductivity in Memristors Based on Germanium Selenide with a Self-forming Current-Conducting Channel Under Various Operating Conditions

**Алёшин А. Н., Рубан О. А.**
*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой микроэлектроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)*
*117105, г. Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5*
*myx.05@mail.ru*

**Alyoshin A. N., Ruban O. A.**
*V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences*
*bld. 5, 7 Nagorny Lane, Moscow, 117105, Russia*
*myx.05@mail.ru*

Приведены экспериментальные данные по измерению сопротивления и электропроводности в низкоомном режиме работы мемристора на основе $Ge_2Se_3$ с самоформирующимся токопроводящим каналом в диапазоне частот переключения и температур. Проведено моделирование, показывающее влияние толщины токопроводящего канала на его электропроводность.
**Ключевые слова:** мемристоры; твердый электролит; энергия активации.

The paper presents experimental data on the measurement of resistance and electrical conductivity in a low-resistance mode of operation of a $Ge_2Se_3$-based memristor with a self-forming current-conducting channel in the range of switching frequencies and temperatures. Simulation has been carried out showing the effect of the thickness of the current-conducting channel on its electrical conductivity.
**Keywords:** memristors; solid electrolyte; activation energy.

Приведены экспериментальные данные по измерению сопротивления и электропроводности в низкоомном режиме работы мемристора на основе селенида германия с самоформирующимся токопроводящим каналом в диапазоне частот переключения и температур. В частотном эксперименте влияние частоты переключений проводилось при комнатной температуре в диапазоне 1–10 000 Гц. Эксперимент по изучению воздействия температуры на сопротивление и электропроводность проводился в интервале температур от −10 до 65 °C при частоте переключений 10 Гц. Показано, что в интервале температур от −10 до 22 °C электрофизические параметры мемристора остаются постоянными, а их изменение (соответственно уменьшение сопротивления и увеличение электропроводности) наблюдается только в интервале температур 22–65 °C. Совокупность экспериментальных результатов может быть объяснена на основе предположения об увеличении площади поперечного сечения токопроводящего канала с увеличением времени рабочего цикла мемристора. Введение соответствующей кинетической константы

позволило представить результаты измерения электропроводности мемристора в интервале температур 22–65 °C в виде закона Аррениуса и определить энергию активации формирования токопроводящего канала. Величина энергии активации равна 0,19 эВ.

Установлено, что форма ВАХ при глубоких отрицательных температурах (−45 °C) и частоте 10 Гц практически идентична форме ВАХ при комнатной температуре и частоте 10000 Гц, причем форма этих ВАХ резко отличается от формы ВАХ, полученной при стандартных условиях работы мемристора (комнатная температура, 10 Гц). Моделирование ВАХ методом конечных элементов на основе использования уравнений Максвелла в стационарном состоянии позволило распространить принцип изменения ширины токопроводящего канала на различные условия работы мемристора, получив идентичные ВАХ для принципиально различных условий его работы.

***Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-29-03003 МК.***

The paper presents experimental data on the measurement of resistance and electrical conductivity in a low-resistance mode of operation of a memristor based on germanium selenide with a self-forming current-conducting channel in the range of switching frequencies and temperatures. In the frequency experiment, the influence of the switching frequency was studied at room temperature in the range 1–10000 Hz. An experiment to study the effect of temperature on resistance and electrical conductivity was carried out in the temperature range of −10–65 °C at a switching frequency of 10 Hz. It has been shown that in the temperature range of −10–22 °C, the electrophysical parameters of the memristor remain constant, and their change (respectively, a decrease in resistance and an increase in electrical conductivity) are observed only in the temperature range of 22–65 °C. The set of experimental results can be explained on the basis of the assumption that the cross-sectional area of the conductive channel increases with an increase in the memristor duty cycle. The introduction of the corresponding kinetic constant made it possible to present the results of measuring the electrical conductivity of the memristor in the temperature range of 22–65 °C in the form of the Arrhenius law and to determine the activation energy of the formation of a conductive channel. The activation energy is 0.19 eV.

It has been found that the shape of the I — V characteristic at deep negative temperatures (−45 °C) and a frequency of 10 Hz is almost identical to the form of the I — V characteristic at room temperature and a frequency of 10000 Hz, and the form of these I — V characteristics differs sharply from the form of the I — V characteristics obtained under standard operating conditions of the memristor (room temperature, 10 Hz). Simulation of the I — V characteristic by the finite element method based on the use of Maxwell's equations in a steady state made it possible to extend the principle of changing the width of the conductive channel to different operating conditions of the memristor, obtaining identical I — V characteristics for fundamentally different operating conditions.

***This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, Grant № 19-29-03003 MK.***

УДК 621.372.061 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.675.676

# Принцип управления пороговыми параметрами в бинарных безреактивных генераторах на мемристорных приборах

## The Control Principle of the Threshold Parameters in Binary Non-reactive Generators Based on Membrane Devices

**Ракитин В. В., Русаков С. Г.**
*Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)*
*124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3*

**Rakitin V. V., Rusakov S. G.**
*Institute for Design Problems In Microelectronics RAS (IPPM RAS)*
*3 Sovetskaya St., Zelenograd, Moscow, 124365*

Обсуждаются вопросы конструирования бинарных безреактивных мемристорных генераторов (БМГ) для осцилляторных нейронных сетей. Выполнен анализ поведения и основных свойств мемристорных генераторов с управлением пороговыми значениями. Показана возможность применения связанных БМГ в качестве элементов бинарных нейроморфных систем.
**Ключевые слова:** безреактивные мемристорные генераторы; осцилляторные нейронные сети; бинарные генераторы; двухпороговый компаратор.

The issues of designing binary reactance-less memristor based oscillators (MBO) for oscillatory neural networks are discussed. The behavior and capabilities of memristor generators with threshold control are considered. The possibility of using coupled MBOs as elements of binary neuromorphic systems is shown.
**Keywords:** reactance-less memristor based oscillators; oscillatory neural networks; binary oscillators; two-threshold comparator.

Применение осцилляторных нейронных сетей (ОНС) является, по оценкам специалистов, перспективным подходом для решения ряда сложных вычислительных проблем, включая распознавание образов, обработку изображений, управление роботами. Один из возможных вариантов построения ОНС — это использование в качестве базовых элементов сети бинарных генераторов, т. е. генераторов с двоичными выходными сигналами. Такой подход предполагает возможность включения двоичных логических элементов в сеть для обеспечения межэлементных связей. Широкий спектр функциональных возможностей сети прогнозируется в этом случае.

В работе обсуждаются перспективы применения безреактивных мемристорных генераторов (БМГ) в качестве сетевых бинарных генераторов. Такие системы позволяют сочетать достоинства мемристоров с возможностями стандартных КМОП ИС, в частности энергонезависимость мемристоров и низкое потребление КМОП логических элементов. Существенной является возможность изготовления совмещенных КМОП ИС и мемристоров по современным интегральным технологиям.

Проектирование генераторов бинарного типа выдвигает дополнительные требования к характеристикам БМГ [1]. Показана эффективность использования БМГ

с кусочно-постоянными параметрами. В этом случае временная зависимость сопротивления мемристора от времени имеет треугольный характер.

Методика выбора желаемых схемотехнических решений в соответствии с такими требованиями базируется на введенном принципе управления пороговыми параметрами. Стандартный подход к управлению в генераторах на основе мемристоров заключается в использовании входного сигнала для управления скоростью изменения состояния мемристора. В отличие от стандартного способа основная идея рассматриваемого подхода к управлению заключается в том, чтобы посылать входной сигнал не на мемристорный прибор, а непосредственно в схему компаратора и, как следствие, управлять поведением генератора путем изменения диапазона варьирования сопротивления мемристора. Свойства мемристорных генераторов с управлением пороговых значений достаточны для проектирования элементов осцилляторных вычислительных архитектур. Применение принципа управления пороговыми параметрами позволяет проектировать новый класс кусочно-постоянных генераторов на базе БМГ и обеспечивает возможности преобразования аналоговых и аналого-цифровых сигналов в двоичные импульсные последовательности. В результате могут быть получены новые типы бинарных генераторных схем на базе кусочно-постоянных генераторов.

В работе обсуждаются преимущества взаимосвязанных бинарных БМГ [2] и их расширенные функциональные возможности. Обсуждаются также типы связей при организации взаимодействия осцилляторов в сети, включая управление одним или обоими пороговыми напряжениями двухпорогового компаратора.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-03012 мк.***

***Литература***

1. Ракитин В. В., Русаков С. Г. Безреактивные мемристорные генераторы как схемотехнические решения искусственных нейронных элементов // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5–3 (102). — С. 752–757.
2. Rakitin V. V., Rusakov S. G. Functional Capabilities of Coupled Memristor-Based Reactance-Less Oscillators // Memristors. Ed. by Dr. Yao-Feng Chang, IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.97808.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.677.679

# Кристаллическая структура и резистивные переключения в NiO

## Crystal Structure and Resistive Switching in NiO

**Божко С. И.[1], Чекмазов С. В.[1], Мазилкин А. А.[1], Мухамедов Б. О.[2], Ионов А. М.[1], Смирнова И. А.[1], Пономарева А. В.[2], Шулятев Д. А.[2], Абрикосов И. А.[2]**

*[1] Институт физики твердого тела РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2*
*[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*
*119049, г. Москва, Ленинский просп., 4*

**Bozhko S. I.[1], Chekmazov S. V.[1], Mazilkin A. A.[1], Mukhamedov B. O.[2], Ionov A. M.[1], Smirnova I. A.[1], Ponomareva A. V.[2], Shulyatev D. A.[2], Abrikosov I. A.[2]**

*[1] Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences*
*2 Ac. Ossipyana St., Chernogolovka, 142432, Russia*
*[2] National University of Science and Technology MISIS*
*4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia*

Сильно коррелированные системы на основе оксидов переходных металлов (VO2, NiO и др.) в настоящее время являются наиболее перспективными с точки зрения разработки новых базовых элементов современной электроники. Воздействие разных факторов, в частности электромагнитного поля, может инициировать в таких соединениях фазовый переход электронной системы, который приводит к сильному изменению электрического сопротивления, что практически эквивалентно переходу между металлом и диэлектриком. NiO является моттовским изолятором, и чрезвычайно чувствителен к наличию точечных дефектов Так, например вакансии никеля приводят к эффективному легированию p-типа. Резистивное переключение, наблюдаемое в NiO, может быть связано с собственными точечными дефектами. Эти дефекты создают состояния на различных уровнях в запрещенной зоне, которые, вероятно, ответственны за перенос заряда. Однако возможна реализация резистивных переключений в NiO на основе моттовского перехода. Поэтому задача разделить эти два механизма является весьма актуальной, а изучение реальной структуры высококачественных монокристаллов и тонких пленок NiO является важной задачей для корректной интерпретации наблюдаемых резистивных переключений.

Поверхность NiO (100), в том числе легированного литием, была исследована после ионной бомбардировки и отжига в сверхвысоком вакууме методами PES, XRD, LEED, AFM, TEM, STEM и STM/STS. Монокристаллы выращены методом бестигельной зонной плавки. Наблюдались различные типы неоднородностей в диапазоне от миллиметрового до нанометрового размера. Эксперименты TEM и STEM демонстрируют самоорганизацию вакансий Ni, в результате чего образуется нанодоменная структура. Природа наблюдаемой нанодоменной структуры была изучена с помощью моделирования ab initio. Расчеты из первых принципов показали, что возможной причиной образования нанодоменной структуры являются искажения решетки, вызванные вакансией Ni. Согласно расчетам, диаметр

искаженной области вокруг вакансии Ni составляет 1,2 нм. Это близко к размеру нанодоменов, наблюдаемых с помощью STM и TEM. Нанодомены оксидов NiOx когерентно связаны через общие структурные элементы [1]. В частности, изображения AFM/STM выявляют необычные фрактальные структуры на поверхности NiO (100).

Для реализации резистивных переключений при воздействии электрического поля STM-зонда была выращена пленка NiO толщиной 35 нм. Над поверхностью пленки в туннельном режиме устанавливался зонд STM (напряжение на зонде −0,6 В, туннельный ток — 0,5 нА). I (V), измеренная при отключенной обратной связи, представлена на рис. 1 (синяя кривая). После этого зонд STM отводился от поверхности на 2 нм и на зонд подавалось напряжение −3,2 В в течение 20 мсек. Зонд возвращался в исходное положение и вновь регистрировалась I (V). В результате приложения импульса напряжения на зонд I (V) изменялась на полупроводниковую со щелью 0,5–0,6 В, при этом никаких изменений в топографии пленки зарегистрировано не было. Такое поведение, по-видимому, связано с реализацией моттовского перехода металл — изолятор на локальном участке поверхности пленки.

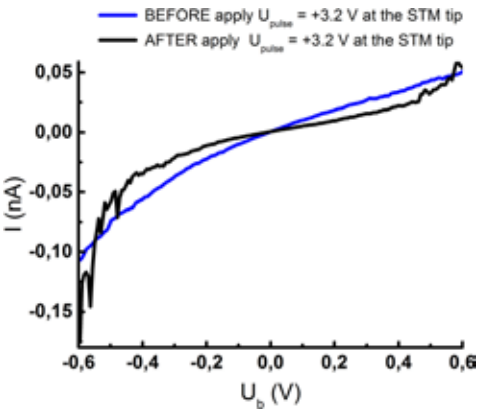



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики, измеренные до (синяя кривая) и после (черная кривая) приложения импульса напряжения на зонд СТМ

***Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-29-03021м).***

***Литература***

1. Walls B., Mazilkin A.A., Mukhamedov B.O., Ionov A., Smirnova I.A., Ponomareva A.V., Fleischer K., Kozlovskaya N.A., Shulyatev D.A., Abrikosov I.A., Shvets I.V., Bozhko S.I. Nanodomain structure of single crystalline nickel oxide // Scientific Reports. 3496, 11, 2021.

Metal oxides display a wide variety of physical properties, stimulating interest from the point of view of fundamental physics and device engineering. NiO is anti-ferromagnetic

and a charge transfer insulator. However, nickel vacancies are common and give rise to an effective p-type doping. NiO is used in spin valves, supercapacitors, hole transport layer in perovskites solar cells, water splitting (Fe doped NiO) and gas sensing.

The macroscopic properties of NiO are extremely sensitive to the presence of point defects. Cation vacancies can induce half-metallicity. In the latter, single defects can produce half-metallicity in either spin channels locally. However, the interaction of vacancies resulting in half-metallicity in the same spin channel is predicted to be energetically favourable. Nickel oxide's antiferromagentic order is predicted to persist even in the presence of the cation vacancy and resulting half-metallicity. The resistive switching observed in a NiO appears to be due to intrinsic point defects. These defects produce states at various levels within the energy gap, which are likely to be responsible for transport within the insulator. Therefore, study of real structure of high quality single crystals and thin films of NiO is an important task of material science.

The (100) surface of NiO and Li doped NiO were studied after ion bombardment and annealing in UHV by photoemission spectroscopy, XRD, LEED, AFM, TEM, STEM and STM/STS. The single crystals were grown by floating zone melting. Different types of inhomogeneities in a range of mm-scale to nano-scale were observed. In particular, AFM/STM images reveal the unusual nanogranular structures on NiO(100) surface. TEM and STEM experiments demonstrate self-assembling of Ni vacancies, resulting in the creation of nanogranular structure. The nature of the observed nanogranular structure was studied using ab initio simulations. The first principles calculations have shown that the possible reason for the nanogranular structure formation is the lattice distortions induced by Ni vacancy. According to the DFT calculations the diameter of the distorted area around the Ni vacancy is 1,2 nm. That is close to the size of the granules observed by SPM and TEM. The granules of $NiO_x$ oxides are coupled coherently through common structural elements [1].

STM/STS experiments performed on 35 nm in thick NiO film have temporally revealed switching of electronic structure in a local region of the sample after a bias voltage $V_b$ pulse was applied at the STM probe. Blue and black I(V) curves in Fig. 1 acquired in tunneling mode before and after −3,2 V pulse was applied on STM probe respectively. The 20 msec bias voltage pulse was applied after STM tip was retracted from the film surface for 2 nm. No changes in STM topography of the film surface produced by bias pulse have been detected in STM experiment. The switching is attributed to Mott transition in a local region of the film induced by electric field generated by $V_b$ pulse applied at STM probe.

***This work was supported by RFBR Grant 19-29-03021m.***

***References***

1. Walls B., Mazilkin A.A., Mukhamedov B.O., Ionov A., Smirnova I.A., Ponomareva A.V., Fleischer K., Kozlovskaya N.A., Shulyatev D.A., Abrikosov I.A., Shvets I.V., Bozhko S.I. Nanodomain structure of single crystalline nickel oxide // Scientific Reports. 3496, 11, 2021.

УДК 538.956 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.680.682

# Бесформовочное нефиламентарное резистивное переключение в трехмерных структурах $W/WO_x/HfO_2/Ru$

## Forming-free Nonfilamentary Resistive Switching in $W/WO_x/HfO_2/Ru$ Three-dimensional Structures

**Королева А. А.[1], Козодаев М. Г.[1], Маркеев А. М.[1], д. т. н.**
*[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*koroleva@phystech.edu*

**Koroleva A. A.[1], Kozodaev M. G.[1], Markeev A. M.[1], Sc.D**
*[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*koroleva@phystech.edu*

Разработана трехмерная вертикальная структура $W/WO_x/HfO_2/Ru$, демонстрирующая эффект бесформовочного нефиламентарного резистивного переключения. Показаны аналоговые свойства структуры, что делает ее перспективной для использования в нейроморфных системах высокой плотности.
**Ключевые слова:** атомно-слоевое осаждение; резистивное переключение; рутений; Vertical RRAM.

A three-dimensional vertical forming-free nonfilamentary resistive switching $W/WO_x/HfO_2/Ru$ structure has been developed. The analog properties of the structure have been shown, which makes it promising for use in high-density neuromorphic systems.
**Keywords:** atomic layer deposition; resistive switching; ruthenium; Vertical RRAM.

На сегодняшний день одной из главных задач, стоящих перед разработчиками новых устройств памяти, является увеличение плотности записи. В последние годы внимание исследователей привлекли устройства типа Vertical RRAM (Resistive Random Access Memory), имеющие трехмерную архитектуру. Такая память, помимо высокой плотности записи, обладает высоким быстродействием, большим ресурсом циклов перезаписи и низким энергопотреблением. Однако при производстве устройств типа Vertical ReRAM для осаждения функционального диэлектрика и электродов «колонного» типа требуются методы, характеризующиеся высокой конформностью при нанесении на структуры с высоким аспектным соотношением. Вместе с тем многие работы по получению ReRAM-элементов выполнены с применением методов ионного распыления. Кроме того, в качестве материала электрода зачастую используется платина. Однако из-за отсутствия стандартных процессов сухого травлении платины ее применение в условиях производства достаточно затруднительно.

В данной работе была разработана трехмерная структура $W/WO_x/HfO_2/Ru$, в которой слои резистивно переключающихся диэлектриков, а также слой верхнего электрода получены методами с высокой конформностью на поверхностях с высоким аспектным соотношением (атомно-слоевое осаждение и термическое

окисление). В качестве альтернативы платиновому электроду в данных структурах применяется рутений, для которого существуют хорошо отработанные процессы сухого плазменного травления. Кроме того, электрод «колонного» типа из Ru был получен методом атомно-слоевого осаждения, что позволяет в перспективе создавать многослойные элементы устройств типа Vertical RRAM на основе данной структуры.

Показано, что резистивное переключение в трехмерных структурах $W/WO_x/HfO_2/Ru$ является бесформовочным. Отсутствие этапа формовки позволяет снизить разброс параметров резистивного переключения и гарантирует идентичность ячеек памяти. Также показана зависимость сопротивления от площади контакта, что указывает на нефиламентарный механизм переключения сопротивления. Отдельное внимание в данной работе уделено аналоговым и синаптическим свойствам структуры $W/WO_x/HfO_2/Ru$.

***Литература***

1. Park S.-G., Yang M.K., Ju H., Seong D.-J., Lee J. et al. A Non-Linear ReRAM Cell with Sub-1μA Ultralow Operating Current for High Density Vertical Resistive Memory (VRRAM) // 2012 International Electron Devices Meeting, 2012. P. 20.8.1–20.8.4.
2. Egorov K.V., Lebedinskii Y.Y., Soloviev A.A., Chouprik A.A., Azarov A.Y., Markeev A.M. Initial and Steady-State Ru Growth by Atomic Layer Deposition Studied by in Situ Angle Resolved X-Ray Photoelectron Spectroscopy // Appl. Surf. Sci., 2017. V. 419. P. 107–113.
3. Kozodaev M.G., Lebedinskii Y.Y., Chernikova A.G., Korostylev E.V., Chouprik A.A., Khakimov R.R., Markeev A.M., Hwang C.S. Temperature Controlled Ru and $RuO_2$ Growth via O* Radical-Enhanced Atomic Layer Deposition with $Ru(EtCp)_2$ // J. Chem. Phys., 2019. V. 151 (20). P. 204701.

Today, one of the main challenges standing before the developers of new memory devices is memory density. Recently, Vertical RRAM (Resistive Random Access Memory) devices with a three-dimensional architecture have attracted the attention of researchers. In addition to high density, this memory has high performance, large endurance and low power consumption. However, Vertical ReRAM requires deposition techniques that are highly conformal to high aspect ratio structures to form functional dielectric and vertical electrode layers. At the same time, many works on ReRAM elements use ion sputtering methods to obtain dielectrics and metal electrodes. In addition, platinum is often used as the electrode material. However, due to the absence of volatile products during dry etching, its use in the production of memory devices is highly undesirable.

In this work, a three-dimensional $W/WOx/HfO_2/Ru$ structure was developed, with layers of resistive switching dielectrics and the top electrode layer, obtained by methods with high conformity (atomic layer deposition and thermal oxidation). As an alternative to the platinum electrode, these structures utilize ruthenium, for which there are well-established dry plasma etching processes. In addition, the vertical Ru electrode was obtained by the atomic-layer deposition, which in the future makes it possible to create multilayer Vertical ReRAM elements based on this structure.

It has been shown that resistive switching in three-dimensional $W/WOx/HfO_2/Ru$ structures is forming-free. The absence of a forming step increases the variability of resistive

switching parameters and guarantees the identity of memory cells. The dependence of the resistance on the top contact area has also been demonstrated, which indicates a nonfilamentary resistance switching mechanism. This work pays special attention to the analog and synaptic properties of the W/WOx/HfO2/Ru structure.

***References***

1. Park S.-G., Yang M. K., Ju H., Seong D.-J., Lee J. et al. A Non-Linear ReRAM Cell with Sub-1μA Ultralow Operating Current for High Density Vertical Resistive Memory (VRRAM) // In 2012 International Electron Devices Meeting, 2012. P. 20.8.1–20.8.4.
2. Egorov K. V., Lebedinskii Y. Y., Soloviev A. A., Chouprik A. A., Azarov A. Y., Markeev A. M. Initial and Steady-State Ru Growth by Atomic Layer Deposition Studied by in Situ Angle Resolved X-Ray Photoelectron Spectroscopy // Appl. Surf. Sci., 2017. V. 419. P. 107–113.
3. Kozodaev M. G., Lebedinskii Y. Y., Chernikova A. G., Korostylev E. V., Chouprik A. A., Khakimov R. R., Markeev A. M., Hwang C. S. Temperature Controlled Ru and $RuO_2$ Growth via O* Radical-Enhanced Atomic Layer Deposition with $Ru(EtCp)_2$ // J. Chem. Phys., 2019. V. 151 (20). P. 204701.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.683.684

# Мемристоры на основе гетероэпитаксиальных структур SiGe

## Memristors Based on Heteroepitaxial SiGe Structures

**Филатов Д. О.[1], Шенина М. Е.[1], Антонов Д. А.[1], Круглов А. В.[1], Шенгуров В. Г.[1], Денисов С. А.[1], Котомина В. Е.[1], Антонов И. Н.[1], Горшков О. Н.[1]**

*[1] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*
*603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23*
*dmitry _filatov@inbox.ru*

**Filatov D. O.[1], Shenina M. E.[1], Antonov D. A.[1], Kruglov A. V.[1], Shengurov V. G.[1], Denisov S. A.[1], Kotomina V. E.[1], Antonov I. N.[1], Gorshkov O. N.[1]**

*[1] Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*
*23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*
*dmitry _filatov@inbox.ru*

Получены лабораторные макеты мемристоров на основе структур Ag/Ge/Si(001) и Ag/Si/Ge/Si(001), принцип действия которых основан на электромиграции ионов $Ag^+$ по дислокациям, прорастающим через слои структур. Исследованы особенности механизма резистивного переключения и процессы деградации мемристоров.

**Ключевые слова:** мемристоры; EpiRRAM; гетероэпитаксиальные структуры SiGe.

Prototype memristors based on Ag/Ge/Si(001) and Ag/Si/Ge/Si(001) stacks, the operation of which is based on the electromigration of $Ag^+$ ions in dislocations growing through the structure layers were fabricated. The features of resistive switching mechanism and memristor degradation were studied.

**Keywords:** memristors; EpiRRAM; heteroepitaxial SiGe structures.

Получены лабораторные макеты устройств энергонезависимой памяти (мемристоров) на основе структур Ag/Ge/Si(001) и Ag/Si/Ge/Si(001) (*англ.* Epitaxial Resistive Random Access Memory — EpiRRAM [1]). Эпитаксиальные слои Ge и Si выращены низкотемпературными методами, совместимыми с Si КМОП-технологией.

Структуры проявляли биполярное резистивное переключение (РП) между двумя состояниями сопротивления. Просвечивающая электронная микроскопия обеспечила прямое подтверждение механизма РП, обусловленного электромиграцией ионов $Ag^+$ вдоль дислокаций. Обнаружена аккумуляция Ag на границе Ge/Si в процессе РП, ограничивающая ресурс EpiRRAM. Также обнаружено униполярное энергозависимое РП, связанное с захватом носителей глубокими дислокационными уровнями.

Для исследования РП в индивидуальных дислокациях применен метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) в сочетании с малоугловым ионным травлением Ag-электрода. АСМ-зонд играл роль подвижного электрода, обеспечивающего контакт к выходу дислокации на поверхность.

***Работа поддержана РФФИ (19-29-03026).***

***Литература***

1. Choi S., Tan S. H., Li Z. et al. SiGe epitaxial memory for neuromorphic computing with reproducible high performance based on engineered dislocations // Nature Materials, 2018. V. 17. P. 335–340.

Prototype non-volatile memory (Epitaxial Resistive Random Access Memory — EpiRRAM [1]) devices (memristors) based on Ag/Ge/Si(001) and Ag/Si/Ge/Si(001) stacks were fabricated. The Ge and Si epitaxial layers were grown by low-temperature methods compatible with Si CMOS technology.

The stacks manifested bipolar resistive switching (RS) between two resistance states. Transmission Electron Microscopy provided a direct confirmation of the RS mechanism based on the $Ag^+$ ion electromigration along the dislocations. Accumulation of Ag at the Ge/Si interface in the course of RS was observed. This effect limits the EpiRRAM durability. Also, unipolar volatile RS was observed. The effect was related to the capture of the charge carriers by the dislocation-related deep traps.

Atomic Force Microscopy (AFM) combined with grazing incidence ion sputtering of the Ag electrodes were applied to study the RS in individual dislocations. The AFM probe played a role of a movable electrode providing a contact to the dislocations at the surface.

***This work was supported by RFBR (19-29-03026).***

***References***

1. Choi S., Tan S. H., Li Z. et al. SiGe epitaxial memory for neuromorphic computing with reproducible high performance based on engineered dislocations // Nature Materials, 2018. V. 17. P. 335–340.

УДК 537.87 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.685.687

# Наноразмерные мультиферроики для применения в магнонной нейроморфной архитектуре

## Nanoscale Multiferroics for Magnonic Neuromorphic Architecture

**Морозова М. А.[1,2], Матвеев О. В.[2], Романенко Д. В.[2], Медников А. М.[1]**
*[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*mamorozovama@yandex.ru mailto:maluginama@yandex.ru*
*[2] Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского*
*410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83*

**Morozova M. A.[1,2], Matveev O. V.[2], Romanenko D. V.[2], Mednikov A. M.[1]**
*[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*mamorozovama@yandex.ru*
*[2] Saratov State University*
*83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russia*

Исследованы спектры спиновых волн в композитных структурах на основе магнонных кристаллов и сегнетоэлектриков нанометровой толщины. Предложена концепция использования таких структур в качестве логических блоков для устройств на базе магнонной нейроморфной архитектуры.
**Ключевые слова:** мультиферроик; спиновые волны; магноника; нейроморфная архитектура.

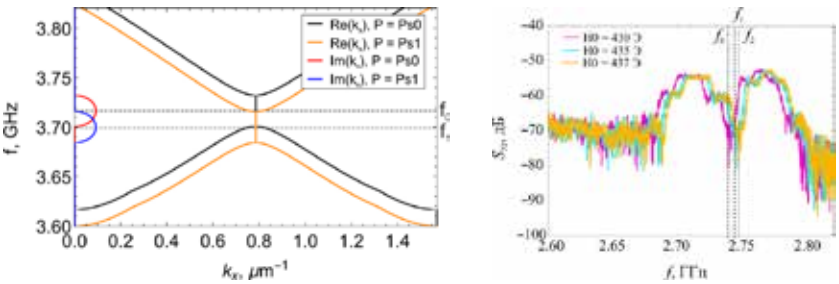
We have studied spin waves spectra in composite heterostructure based on nanoscale magnonic crystal and ferroelectric. Besides, we have offered a concept of using such sctructures as a logic blocks for magnonic neuromorphic architecture.
**Keywords:** multiferroic; spin waves; magnonics; neuromorphic architecture.

Одно из ключевых направлений развития вычислительной техники в настоящее время — разработка систем на основе нейроморфной архитектуры, призванных увеличить производительность задач обучения и использования нейронных сетей [1]. В настоящее время активно исследуются и разрабатываются технологии сегнетоэлектрической памяти, при этом использование волноведущих свойств ферромагнитных структур совместно со свойствами гистерезиса открывает новые возможности для уменьшения энергопотребления запоминающих устройств [2]. При этом важной является задача миниатюризации устройств, для чего необходим переход к наноразмерным пленочным структурам [3].

В настоящей работе исследуются возможности применения мультиферроидных структур в качестве мемристора. Исследуемая структура представляет собой магнонный кристалл и сегнетоэлектрический конденсатор (СЭ). Будем называть такую слоистую структуру мультиферроидным спинволновым мемристором (МФСМ), в ней сегнетоэлектрик обеспечивает запись и хранение информации, а волноведущая ферромагнитная среда — считывание. В работе построена

теоретическая модель, описывающая распространение спиновых волн с учетом обменного взаимодействия [4] и магнитоэлектрического эффекта [5] в МФСМ.

На рис. 1*а* показаны дисперсионные характеристики спиновых волн в МФСМ в полосе первого брэгговского резонанса в зависимости от поляризации СЭ. Видно, что при $P = P_{s1}$ центральная частота ЗЗ ($f_1$) сдвинута относительно центральной частоты ЗЗ при $P = P_{s0} = 0$ ($f_0$) на величину порядка 2 МГц. Таким образом, в описанном случае реализуется двухуровневое состояние для сигналов с двумя частотами. В результате сохраняемые биты 0 (либо 1) будут соответствовать попаданию (либо непопаданию) контрольной частоты в запрещенную зону. Такой тип мемристора обладает рядом преимуществ, среди которых значительный контраст между логическими состояниями, возможность создания многоуровневых состояний посредством подачи сигналов разной частоты или мощности.




*а* *б*

**Рис. 1.** Дисперсионные характеристики спиновых волн в МФСМ с модуляцией ширины в зависимости от поляризации сегнетоэлектрика (а); АЧХ спиновых волн в структуре с модуляцией толщины при различных значениях внешнего магнитного поля (*б*)

Для экспериментального исследования были использованы пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 100 нм с периодической модуляцией толщины пленки (глубина канавок составляла 10 нм, период $L = 4$ мкм). На АЧХ спиновых волн в такой структуре (рис. 1*б*) видны провалы, отвечающие брэгговскому резонансу, положение которых зависит от внешнего магнитного поля. Следует отметить, что изменения эффективного внутреннего поля в ЖИГ могут быть получены как при изменении внешнего магнитного поля, так и при изменении поляризации сегнетоэлектрического слоя, таким образом, возможна реализация описанной выше концепции записи и считывания состояния в МФСМ.

Таким образом, в работе показано, что использование композитных мультиферроидных структур может стать основой для запоминающих и логических устройств в магнонных нейроморфных системах.

***Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-03049-мк).***

***Литература***

1. Zhu J. et al. A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices // Appl. Phys. Rev., 2020. Vol. 7. P. 011312.

2. Matveev O., Morozova M., Romanenko D. Concept of using composite multiferroic structure magnonic crystal — ferroelectric slab as memory unit // Journal of Physics: Conference Series, 2019. Vol. 1389. P. 012041.
3. Heinz B. et al. Propagation of Spin-Wave Packets in Individual Nanosized Yttrium Iron Garnet Magnonic Conduits // Nano Letters, 2020. Vol. 20. P. 4220.
4. Kalinikos B. A., Slavin A. N. Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions // J. Phys. C: Solid State Phys., 1986. Vol. 19. P. 7013.
5. Fetisov Y. K., Srinivasan G. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator // Appl. Phys. Lett., 2006. Vol. 88. P. 143503.

УДК 537.622 + 544.015.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.688.690

# Исследование мемристивных планарных структур на основе легированных манганитов

## Investigation of Memristive Planar Structures Based on Doped Manganites

**Тулина Н. А.[1], Россоленко А. Н.[1], Шмытько И. М.[1], Иванов А. А.[3], Зотов А. В.[2], Сироткин В. В.[2], Борисенко И. Ю.[2], Тулин В. А.[2]**
*[1] Институт физики твердого тел РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2*
*anr@issp.ac.ru*
*[2] Институт проблем микроэлектроники и чистых веществ РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*
*[3] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

**Tulina N. A.[1], Rossolenko A. N.[1], Shmytko I. M.[1], Ivanov A. A.[3], Zotov A. V.[2], Sirotkin V. V.[2], Borisenko I. Y.[2], Tulin V. A.[2]**
*[1] Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences*
*2 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia*
*tulina@issp.ac.ru*
*[2]Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia*
*[3] National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*

Экспериментально и методом численного моделирования исследованы механизмы физико-химических процессов на интерфейсах металл — легированный манганит $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-\delta}$, определяющие мемристивные свойства структур на их основе.
**Ключевые слова:** резистивная память; гетероструктуры; легированные манганиты; кислородное допирование; фазовое расслоение; переход металл — изолятор.

The paper presents mechanisms of physicochemical processes at the metal/doped manganite $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-\delta}$ interfaces determining the memristive properties of structures based on them that are investigated experimentally and by numerical modeling.
**Keywords:** resistive switching memory; interface structures; metal oxides; Schottky diode; charge transport; oxygen vacancies.

Проблема мемристоров с точки зрения определения механизма, управляющего мемрезистивными свойствами различных структур, «многовекторная» и определяется прежде всего функциональными свойствами материалов, из которых сделана структура, и конечной целью, то есть каковы эти мемрезистивные свойства, которые должны демонстрировать изучаемые структуры. Существующие теоретические представления связывают большинство свойств легированных

манганитов (ЛМ) не только со степенью легирования щелочноземельным атомом, но также с кислородной стехиометрией, которая значительно определяет транспортные, магнитные свойства ЛМ. При определенных условиях манганиты могут существовать в состоянии фазового расслоения (ФРС) на ферромагнитную и парамагнитную фазы (фаза Гриффитса) [1, 2]. Именно дефицит кислорода является характерной особенностью поверхностных и интерфейсных фаз и лежит в основе формирования мемристивных структур на базе ЛМ

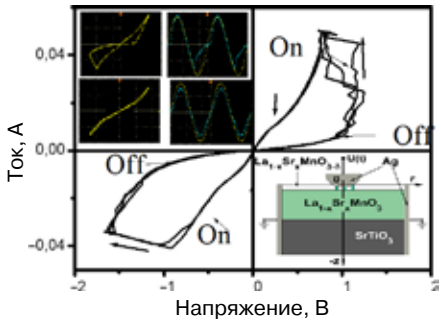



**Рис. 1.** Пример ВАХ мемристивной структуры Ag/LSMO$_\delta$/LSMO/SrTO с резистивными переключениями. ***Особенность*** (отмеченная стрелкой) проявляется на ВАХ мемристоров с верхним электродом большого диаметра. Численные расчеты показали, что такие особенности обусловлены эффектами перегрева. В правом нижнем углу схема *планарной* гетероструктуры с верхним серебряным электродом в форме полуокружности в кислород-дефицитном слое. В верхнем левом углу осцилограммы ВАХ гетероконтакта при f = $10^{-2}$ и 100 Гц

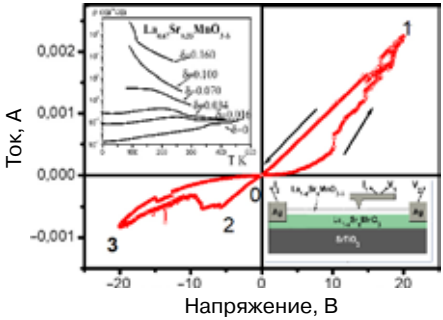



**Рис.2.** ВАХ структуры Ag/LSMO$_\delta$/LSMO/SrTiO с механическим микроконтактным электродом на пленочной основе. В левом верхнем углу температурная зависимость сопротивления пленки **$La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$** и температурная зависимость удельного сопротивления кислород-дефицитных кристаллов $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_{3-d}$ [4]. На ВАХ наблюдаются некоторые неоднородности, которые мы связываем с влиянием тока на доменную структуру ферромагнитной пленки

Получены и исследованы структуры на основе монокристаллов и эпитаксиальных пленок ЛМ $\mathbf{La_{1-x}Sr_xMnO_{3-\delta}}$ (LSMO). Как можно заключить из исследований фотоэлектронной спектроскопии [3], на поверхности монокристаллов и пленок LSMO существует деградированный по кислороду слой, обозначим его как $\mathbf{LSMO_{\delta}}$. Вследствие этого гетероконтакт, выполненный на такой поверхности, имеет достаточно высокое сопротивление, которое определяется этим поверхностным слоем. Такой гетероконтакт и является базисным объектом для наблюдения эффектов резистивных переключений. Поверхностный слой определяет сопротивление гетероконтакта и отражает изменение фазового состава манганита в результате воздействия электрического поля и температуры вследствие эффектов перегрева

На рис. 1–2 представлены основные результаты.

***Работа поддержана в части государственных заданий Института физики твердого тела РАН, Института проблем микроэлектроники и особочистых материалов РАН, а также грантом РФФИ № 19-29-03021 мк.***

***Литература***

1. Salamon M. B., Lin P., Chun S. H. Colossal magnetoresistance is a Griffiths singularity // Phys. Rev. Lett., 2002. V. 88. P. 197203–197207.
2. Mishra D. K., Roul B. K., Singh S. K., Srinivasu V. V. Possible observation of Griffith phase over large temperature range in plasma sintered $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ // J. Magn. Magn. Mater., 2018. V. 448. P. 287–291.
3. Chaika A. N., Ionov A. M., Tulina N. A., Shulyatev D. A. and Mukovskii Ya. M. Degradation of $La_{0.8}Ca_{0.2}MnO_3$ single crystal surface: electron spectroscopy studies // Journ. Electron Spectroscopy and Related Phenomenon, 2005. V. 148. P. 101–105.
4. Байков Ю. М., Никулин Е. И., Мелех Б. Т., Егоров В. М. Проводимость, магнетосопротивление и теплоемкость кислород-дефицитного $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_{3-\alpha}$ // Физика твердого тела, 2004. — Т. 46. — Вып. 11. — С. 2018–2024.

УДК 004.93 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.691.693

# Ассоциативная память системы антиферромагнитных осцилляторов для задачи распознавания изображений

## Associative Memory of a System of Antiferromagnetic Oscillators for Image Recognition Task

**Митрофанова А. Ю.[1], Сафин А. Р.[2,3], Егоров Д. П.[2], Кравченко О. В.[1,2,4], Базенков Н. И.[5]**
*[1] МГТУ им. Н. Э. Баумана*
*105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*
*[2] ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН*
*125009, г. Москва, ул. Моховая, 11/7*
*[3] Национальный исследовательский университет «МЭИ»*
*111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14*
*[4] ФИЦ ИУ РАН*
*119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40*
*[5] ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН*
*117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65*

**Mitrofanova A. Yu.[1], Safin A. R.[2,3], Egorov D. P.[2], Kravchenko O. V.[1,2,4], Bazenkov N. I.[5]**
*[1] Bauman MSTU*
*bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005*
*[2] Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences*
*11/7 Mokhovaya St., Mosscow, 125009, Russia*
*[3] Moscow Power Engineering Institute*
*14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russia*
*[4] Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS*
*40 Vavilova, Moscow, 119333*
*[5] V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences*
*65 Profsoyuznaya St., Moscow, 117997, Russia*

Реализована ассоциативная память на основе ансамбля антиферромагнитных спинтронных осцилляторов для задачи распознавания изображений. Приведены примеры распознаваемых и восстановленных образов. Представлены ошибки классификации для разных значений отношения сигнала к шуму и разного количества распознаваемых образов.
**Ключевые слова:** ассоциативная память; антиферромагнитный осциллятор; правило Хебба.

The paper deals with the implementation of associative memory in an antiferromagnet-heavy metal structure for the problem of image recognition. In addition, it gives examples of recognizable and restored images, as well as classification errors for different values of the signal-to-noise ratio and a different number of recognized patterns.
**Keywords:** associative memory; antiferromagnetic oscillator; Hebbian learning rule.

Данная работа посвящена реализации ассоциативной памяти в гибридной структуре антиферромагнетик — тяжелый металл под действием лазерных импульсов в задаче о распознавании визуальных образов (изображений). В качестве модели будем использовать модель резистивно связанных нелинейных осцилляторов, описывающую процессы в антиферромагнетиках (АФМ) в рамках сигма-модели [1]. В зависимости от наличия или отсутствия внешнего воздействия сигнала амплитуды $A$ на АФМ, а также от отношения плотности постоянного тока к плотности критического $j_{dc}/j_{th}$ в нейроморфной модели в системе наблюдаются спайковый, автоколебательный или затухающий режимы. В данной работе для задачи распознавания изображений рассматривается исключительно спайковый режим. Рассмотрим модель вида

$$\begin{cases} \dfrac{d\phi_n}{dt} = \eta_n, \\ \dfrac{d\eta_n}{dt} = -\alpha\omega_{ex}\eta_n - \dfrac{\omega_e\omega_{ex}}{2}\sin(2\phi_n) + \sigma\left(j_{dc} + A\sin(\omega_{ext}t)\right) + \sum\limits_m k_{nm}\eta_m, \end{cases} \quad (1)$$

где $\phi_n$ — фаза n-го осциллятора, $\alpha$ — коэффициент затухания, $\omega_{ex}$ — обменная частота, $\omega_e$ — частота анизотропии, $\sigma$ — коэффициент, характеризующий эффект переноса спина, $j_{dc}$ — плотность постоянного тока, $k_{nm}$ — коэффициенты связи m-го осциллятора с n-м.

Под задачей распознавания образа, здесь — бинарной матрицы размером $10\times10$, к значениям которой добавлен белый гауссов шум, подразумевается задача удаления этого шума. От нейроморфной модели (1) требуется предъявление изображения-эталона — одного из семи паттернов обучающей выборки. Сама нейроморфная модель состоит из $N = 100$ антиферромагнитных осцилляторов, связанных шинами тяжелого металла. Запоминание системой образов осуществляется посредством вычисления коэффициентов связи $k_{nm}$ по правилу Хебба, где входящие в формулу $\xi_n^i$ и $\xi_m^i$ являются $n$-ми и $m$-ми значениями развернутого в строку $i$-го изображения из $p$ имеющихся в обучающей выборке

$$k_{nm} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{p}\xi_n^i\xi_m^i. \quad (2)$$

Откликом памяти на образ здесь называется установление определенного колебательного режима в системе осцилляторов: нейроны должны колебаться синфазно — в случае, когда входные данные представлены одинаковыми цветами, и противофазно в другом случае [1]. Входными данными же являются начальные условия, накладываемые на $\phi$, которые принимают значения 0 и $\pi$ в зависимости от цвета пикселя. Начальные условия для $\eta$ нулевые. На рис. 1 показаны зашумленное и распознанное изображения. Расстояние Хэмминга между изображением, которое восстановила система антиферромагнитных осцилляторов, и изображением-эталоном составило 11.

Восстановленные таким образом изображения сравнивались с изображениями из обучающей выборки по мере Хэмминга. Распознаваемые изображения из тестовой выборки отличались отношением сигнала к шуму (SNR). На рис. 2 представлены графики зависимости ошибки распознавания отдельного образа и общей ошибки от SNR. Значения на графиках являются средними для двадцати итераций эксперимента, максимально возможное значение ошибки — 100. В то время как

общей зависимости ошибки от отношения сигнала к шуму не наблюдается, в большинстве случаев расстояние Хэмминга достигает большего значения для меньшего SNR. Отсутствие явно выраженной зависимости является поводом для дальнейшего изучения данного вопроса с использованием других видов шумов.

*а* *б*

**Рис. 1.** Зашумленное и распознанное ансамблем АСО изображения

Для выяснения зависимости ошибки от количества распознаваемых образов их число увеличивалось от одного до семи с вычислением ошибки распознавания каждого образа, имеющегося в обучающей выборке, и общей ошибки. Результаты проведенных экспериментов приведены на рис. 4. На основании полученных результатов можно говорить о том, что для выбранных изображений количество распознаваемых образов не приводит к линейному возрастанию ошибки. Остается открытым вопрос влияния самого добавляемого в выборку паттерна.

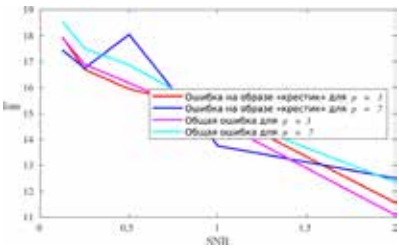



**Рис. 3.** Зависимость ошибки от отношения сигнала к шуму

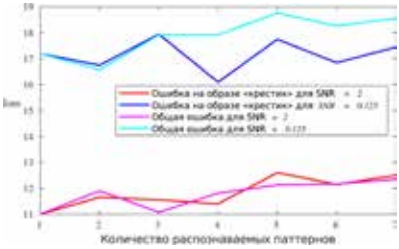



**Рис. 4.** Зависимость ошибки от количества образов в обучающей выборке

***Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-03015.***

***Литература***

1. Khymyn R., Lisenkov I., Voorheis J., Sulymenko O., Prokopenko O., Tiberkevich V., Akerman J., Slavin A. Ultra-fast artificial neuron: generation of picosecondduration spikes in a current-driven antiferromagnetic auto-oscillator // Scientific Reoprts. 2018. Vol. 8. № 15727.

УДК 004.89 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.694.695

# Исследование возможности построения цифрового двойника интегральных схем для анализа и прогнозирования их надежности

## Research on the Possibility of Constructing a Digital Twin of Integrated Circuits for Analyzing and Predicting Their Reliability

**Тельминов О. А.[1], к. т. н., Горнев Е. С.[1], член-корр. РАН, д. т. н., Черняев Н. В.[2], к. т. н., Янович С. И.[1], Мошкарова Л. А.[1], Шахманова М. В.[1]**
*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*otelminov@niime.ru*
*[2] ПАО «Микрон»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*nchernyaev@mikron.ru*

**Telminov O. A.[1], Ph.D, Gornev E. S.[1], Sc.D, Corresponding Member of RAS, Chernyaev N. V.[2], Ph.D, Yanovich S. I.[1], Moshkarova L. A.[1], Shakhmanova M. V.[1]**
*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*otelminov@niime.ru*
*[2] Mikron JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*nchernyaev@mikron.ru*

Работа посвящена оценке возможности и эффективности построения цифрового двойника интегральных схем. Рассмотрены существующие методы построения и варианты применения цифрового двойника, а также этапы его формирования. Проведен анализ надежности интегральных схем на основе результатов испытаний.
**Ключевые слова:** цифровой двойник; интегральная микросхема; надежность.

The work is devoted to assessing the possibility and efficiency of developing a digital twin of integrated circuits. The existing methods of construction and options for using a digital twin, as well as the stages of its creation have been considered. The analysis of the reliability of integrated circuits based on the test results has been carried out.
**Keywords:** digital twin; integrated circuit; reliability.

Целью работы является оценка возможности разработки интеллектуального цифрового двойника (ЦД) интегральных схем (ИС). Принципиальным отличием ЦД от существующих математических и физических моделей является максимально близкое соответствие физического объекта и его цифровой копии с инженерной погрешностью не более 5% для любого из анализируемых параметров. ЦД ИС включает все этапы жизненного цикла такой схемы: проектирование, изготовление, испытания, эксплуатацию и утилизацию.

В идеальном случае по заданным функциональным характеристикам перспективной ИС с помощью ЦД появляется возможность виртуально, без создания тестовых партий ИС, провести анализ результатов автоматического проектирования, проследить за процессами формирования слоев ИС при изготовлении [1], выполнить

необходимые измерения, получить результаты испытаний и эксплуатации при воздействии различных факторов, исследовать вопросы экологичности переработки вышедшей из употребления ИС. При положительной оценке соответствия комплекса показателей на всем жизненном цикле ИС заданным критериям принимается решение о запуске такой ИС в серию с необходимым для заказчика объемом.

На пути к идеальному ЦД в области микроэлектроники ученые предлагают новые подходы, а крупные корпорации внедряют свои программно-аппаратные решения, например численное моделирование и симуляцию производства в Siemens Numerical Controls Ltd. Повышенный интерес к ЦД обеспечивается развитой поддержкой реализации нейросетевого подхода и необходимых условий его применения: наличие большого объема измерений и испытаний по широкой номенклатуре разрабатываемых и производимых ИС, допущение незначительной погрешности в результатах расчетов. Скорость расчета слабо формализуемых задач с помощью нейросетей значительно превышает аналогичный параметр для классических алгоритмов с полным расчетом по строгим законам и уравнениям. В наших организациях это подтверждается решением задач по оптимальному размещению множества кристаллов ИС на одной пластине [2], результатами применения байесовских сетей для анализа параметров промышленного производства ИС [3], ведется интенсивная разработка моделей, в том числе и компактных, в области виртуальной фотолитографии, а также функционирования ИС при различных условиях.

Ключевой фактор функционирования ИС при воздействии различных факторов — обеспечение заданной надежности и наработки на отказ. В работе рассмотрены классические подходы статистической теории надежности, физических законов механизма деградации параметров ИС, комбинированный подход. Проведен анализ параметров в ходе выполнения приемо-сдаточных испытаний методами математической статистики. Применен нейросетевой подход, включая многослойный персептрон и обобщенно-регрессионные сети, для прогнозирования значений параметров после испытаний и оценки надежности ИС. Сформулирован план по развитию построения ЦД ИС для анализа и прогнозирования их надежности.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: применение методов создания ЦД для оценки надежности схем, результаты моделирования ИС.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Исследование влияния материала верхнего электрода на свойства МДП структур / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Национальный исследовательский университет «МИЭТ». — Москва, 1989.
2. Балан Н. Н., Березин А. А., Горнев Е. С. и др. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 543–548. — DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.543.548.
3. Тельминов О. А., Горнев Е. С., Мошкарова Л. А. и др. Оценка возможности применения нейросетевого байесовского подхода к выявлению корреляции между параметрами тестовых элементов для межоперационного контроля технологического процесса и характеристиками формируемой транзисторной структуры // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 559–560. — DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.559.560.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.696.697

# Модель оценки времени выполнения OPC для Calibre OPCpro

## OPC Runtime Estimation Model for Calibre OPCpro

**Кузовков А. В., Иванов В. В., Балан Н. Н., к. т. н., Харченко Е. Л.**
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*akuzovkov@niime.ru*

**Kuzovkov A. V., Ivanov V. V., Balan N. N., Ph.D, Kharchenko E. L.**
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*akuzovkov@niime.ru*

Предложен способ оценки времени выполнения коррекции эффектов оптической близости на основе искусственных нейронных сетей.
**Ключевые слова:** коррекция оптической близости; литография; разрешающая способность; время счета.

The paper presents a method for OPC runtime estimation based on artificial neural networks.
**Keywords:** optical proximity correction; lithography; resolution; runtime.

Микроэлектроника является одной из самых стремительно развивающихся отраслей промышленности [1]. По мере уменьшения топологических норм технология все больше опирается на уменьшение коэффициента k1 вместо увеличения числовой апертуры и сокращения длины волны. В связи с этим каждое поколение технологии требует все более сложных OPC-решений для достижения нового уровня разрешающей способности. Результатом такого усложнения со временем стал экспоненциальный рост требуемой вычислительной мощности.

Длинные циклы обработки усложняют планирование производственных процессов и могут значительно замедлить производственный цикл в целом. Предварительная оценка времени выполнения OPC позволит снизить неопределенность при планировании работ. Кроме того, оценка времени счета позволит выявить проекты, в которых не соблюдены рекомендации правил проектирования по обеспечению максимальной иерархичности топологии. Такие проекты могут быть вовремя отправлены на корректировку.

Таким образом, для планирования работ необходимо иметь возможность оценить время обработки того или иного фотошаблона. Попытка построить такую теоретическую модель представлена в работе [2]. Модель учитывает как сложность топологии, так и доступные вычислительные ресурсы. Однако универсальность модели компенсируется грубостью оценки. В отличие от [2] в данной работе предлагается подход к построению эмпирической модели, обучаемой на примерах.

Искусственные нейронные сети хорошо зарекомендовали себя в задачах регрессии [3]. Предложенная модель оценки времени счета на основе искусственной нейронной сети классической архитектуры «многослойный персептрон» позволила определять порядок требуемого времени. Модель обучалась на примерах коррекции топологических ячеек, подготовленных с применением генератора топологии

случайной конфигурации [4]. Наибольшую точность оценки продемонстрировали модели с двумя скрытыми слоями и числом нейронов от 16 до 60 в каждом слое. Лучший результат достигнут при использовании 36 нейронов в первом слое и 32 — во втором.

Предложенный подход оценки времени выполнения ОРС на основе искусственных нейронных сетей позволяет прогнозировать время счета с точностью около 61 %. Такая точность не позволяет корректно прогнозировать время выполнения ОРС, но позволяет оценить его порядок, что уже добавляет определенности в планировании.

Отметим, что, независимо от используемой архитектуры модели, результат в значительной степени зависит от репрезентативности топологических ячеек, на которых обучается модель. При этом ввиду большого многообразия реальных топологий построение идеально репрезентативных ячеек гарантировать невозможно. Таким образом, в случае некорректной работы модели встанет задача сравнения рабочей топологии с ячейками обучающей выборки для определения применимости модели.

Кроме того, в работе сделано допущение о постоянной средней загруженности вычислительных ресурсов, что не всегда верно, поэтому дальнейшие работы также будут направлены на расширение модели для учета доступных мощностей.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
2. Chris Spence, Scott Goad. Computational requirements for OPC // Proc. SPIE 7275, Design for Manufacturability through Design-Process Integration III, 72750U (12 March 2009). URL: https://doi.org/10.1117/12.813522.
3. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории. — М.: РиС, 2015. — 496 с.
4. Ипатова Е. В., Харченко Е. Л. Генерация топологии случайной конфигурации для отработки ОРС-модели // Наноиндустрия, 2019, спецвыпуск. — С. 250–253.

УДК 544.344.015.4 + 620.181 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.698.699

# Динамика управляемого контраста оптических свойств тонких пленок GeTe и $Ge_2Sb_2Te_5$

## The Controlled Contrast Dynamics of the GeTe and $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Films Optical Properties

**Киселев А. В., Ионин В. В., Бурцев А. А., Елисеев Н. Н., Михалевский В. А., Лотин А. А.**
*ИПЛИТ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*
*140700, г. Шатура, ул. Святоозёрская, 1*

**Kiselev A. V., Ionin V. V., Burtsev A. A., Yeliseyev N. N., Mikhalevskiy V. A., Lotin A. A.**
*ILIT RAS — branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS*
*1 Svyatoozerskaya St., Shatura, 140700*

В работе представлены результаты исследования динамики управляемого изменения оптических свойств при лазерно-управляемом фазовом переходе в тонких пленках теллурида германия и соединения Ge-Sb-Te (225). Показано, что сильный контраст свойств разных фаз позволяет обеспечить стабильное многоуровневое переключение.

**Ключевые слова:** халькогениды; фазоизменяемые материалы; лазерно-инициированные фазовые переходы; кристаллизация.

Халькогениды — это материалы, содержащие один (или несколько) элементов VI группы таблицы Менделеева, а именно S, Se или Te. Обладая типичными свойствами твердотельных полупроводниковых материалов, аморфные полупроводники также проявляют ряд эффектов, которые уникальны для аморфной фазы: по своей природе метастабильные, они могут претерпевать переходы между различными состояниями, обычно в результате нагрева. Быстрый нагрев может быть осуществлен с помощью воздействия на материал лазерным излучением достаточной интенсивности. Применение оптических методов позволяет осуществлять изменение фазового состава за времена, лежащие в диапазоне 30–800 нс, для прямого перехода [1, 2] из аморфного в кристаллическое и порядка 10 нс для обратных переходов из кристаллического в изначальное аморфное состояние [2, 3].

Одним из наиболее известных фазоизменяемых материалов (ФИМ) являются теллурид германия (GeTe) и его сплав $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST). Данные материалы широко используются в устройствах оптической памяти с высокой плотностью записи, дисплеях, а также в оптических модуляторах, синапсах и мемристорах [4].

В данной работе экспериментально демонстрируется обратимое изменение оптических свойств тонкопленочных образцов, связанное с фазовыми переходами под воздействием импульсного лазерного излучения по схеме pump-probe [5]. Образцы подвергались кристаллизации и аморфизации воздействием как единичного лазерного импульса, так и нескольких импульсов с меньшей энергией. С помощью данных спектрометрии продемонстрирован контраст оптических свойств в широком диапазоне от 200 до 22000 нм [6]. Полученные результаты показывают, что область применения халькогенидных материалов на основе теллурида германия

можно эффективно расширить на дальний и средний ИК-диапазон, не ограничиваясь ближним ИК- и видимым спектром [7].

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта № 075-15-2019-1950 в части синтеза образцов GST, государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН № 075-00486-21-00 в части исследования их структурных свойств, а также гранта РФФИ № 19-29-12024 в части изучения динамики изменения оптических свойств образцов.***

***Литература***

1. Raoux S., Cheng H.-Y., Caldwell M.A. and Wong H.-S.P. Appl. Phys. Lett. 2009, 95, 071910.
2. Guo P., Sarangan A.M. and Agha I. Appl. Sci. 2019, 9, 530.
3. Raoux S., Wuttig M. (ed.). Phase Change Materials. Science and Applications. Springer Science+Business Media, 2009.
4. Zhang W., Mazzarello R., Wuttig M., Ma E. Nature Reviews Materials 2019, 4: 150–168.
5. Ionin V.V., Kiselev A.V., Eliseev N.N., Mikhalevsky V.A., Pankov M.A., Lotin A.A., Appl. Phys. Lett. 117 (2020) 011901.
6. Eliseev N.N., Kiselev A.V., Ionin V.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A., Pankov M.A., Karimov D.N., Lotin A.A. Results in Physics, 19 (2020) 10346.
7. Sreekanth K.V., ElKabbash M., Caligiuri V., Singh R., De Luca A., Strangi G. New Directions in Thin Film Nanophotonics. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019.

УДК 544.344.015.4 + 620.181 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.700.701

# Исследование электрической проводимости при фазовых переходах в тонких пленках GeTe и GST под действием лазерного излучения наносекундной длительности

## Study of Electrical Conductivity at the Phase Transitions in Thin Films GeTe and GST Under the Action of Nanosecond Laser Radiation

**Елисеев Н. Н., Ионин В. В., Киселев А. В., Бурцев А. А., Михалевский В. А., Лотин А. А.**
*ИПЛИТ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*
*140700, г. Шатура, ул. Святоозёрская, 1*

**Yeliseyev N. N., Ionin V. V., Kiselev A. V., Burtsev A. A., Mikhalevskiy V. A., Lotin A. A.**
*ILIT RAS — branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS*
*1 Svyatoozerskaya St., Shatura, 140700*

Тонкие пленки GeTe и GST подвергались импульсному лазерному воздействию наносекундной длительности, которое приводит к переходу между фазовыми состояниями материалов, что подтверждается рентгеновскими дифрактограммами и контролируется измерением электрической проводимости и отражательной способности образцов.
**Ключевые слова:** тонкие пленки**;** фазоизменяемые материалы; оптические вычисления; лазерно-инициированные фазовые переходы; нейроморфные вычислительные системы.

Тонкие пленки теллурида германия (GeTe) и сплава на его основе $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) могут быть использованы не только в устройствах энергонезависимой памяти [1], но и для элементов вычислительных устройств нового поколения, которые совмещают в себе функции хранения и обработки информации, и могут найти применение в нейроморфных вычислительных системах [2].

Данные материалы могут подвергаться быстрой кристаллизации при освещении короткими наносекундными лазерными импульсами, что сопровождается заметным увеличением (более 50 %) отражательной способности пленок в среднем и дальнем ИК-диапазоне, обусловленной электронной структурой материала, между аморфным и кристаллическим фазовыми состояниями [3, 4]. Благодаря цилиндрическому распределению интенсивности импульсного лазерного излучения полный фазовый переход из аморфного состояния в кристаллическое и обратно в тонких пленках GeTe и GST может быть реализован как в моноимпульсном, так и в многоимпульсном (5 и более) режимах [5].

Демонстрируются ступенчатый характер изменения электрический проводимости более чем на два порядка и высокая скорость переключения для прямых фазовых переходов из аморфного состояния в кристаллическое, где время изменения проводимости тонких пленок GeTe составляет 20,2 и 52 нс при обратном фазовом переходе (стекловании), для тонких пленок GST — 32 и 62 нс соответственно.

Управляемый ступенчатый характер изменения электрической проводимости, высокая скорость переключения, оптический контраст и наличие нескольких кристаллических фаз, подтверждаемых методом рентгеновской дифракции, — все это может обеспечить мультибитную запись и высокую скорость обработки информации в гибридных оптико-электронных устройствах на основе этих материалов [6].

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта № 075-15-2019-1950 в части синтеза образцов GST, государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН № 075-00486-21-00 в части исследования их структурных свойств, а также гранта РФФИ № 19-29-12024 в части изучения динамики изменения оптических свойств образцов.***

***Литература***

1. Guo P., Sarangan A. M. and Agha I. Appl. Sci. 2019, 9, 530.
2. Zhang W., Mazzarello R., Wuttig M., Ma E. Nature Reviews Materials 2019, 4: 150–168.
3. Eliseev N. N., Kiselev A. V., Ionin V. V., Mikhalevsky V. A., Burtsev A. A., Pankov M. A., Karimov D. N., Lotin A. A. Results in Physics, 19 (2020) 10346.
4. Weidenhof V., Friedrich I., Ziegler S., Wuttig M. J. Appl. Phys. 89, 3168 (2001).
5. Ionin V. V., Kiselev A. V., Eliseev N. N., Mikhalevsky V. A., Pankov M. A., Lotin A. A., Appl. Phys. Lett. 117 (2020) 011901.
6. Ovshinsky S. R. Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43. № 7B, 2004. P. 4695–4699.

УДК 537.622 + 544.015.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.702.704

# Мемристивные структуры на основе флейков селенида висмута

## Memristive Structures Based on Bismuth Selenide Flakes

**Зотов А. В., Ильин А. И., Трофимов О. В., Тулин В. А.**
*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*
*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*
*taba@iptm.ru*

**Zotov A. V., Ilyin A. I., Trofimov O. V., Tulin V. A.**
*Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia*
*taba@iptm.ru*

Методом электронной литографии созданы мемристивные структуры на основе флейков селенида висмута. Исследованы мемристивные переключения и возможность управления многоуровневыми мемристивными состояниями в полученных микроструктурах.
**Ключевые слова:** мемристоры; память на резистивных переключениях; халькогениды; гетероструктуры; электронная литография.

Memristive structures based on bismuth selenide flakes were created by the method of electronic lithography. Resistive switching and the possibility of controllable multilevel memristive state based on the obtained microstructures have been investigated.
**Keywords:** memristors; memory on resistive switching; chalcogenides; heterostructures; electron lithography.

Среди новых технологий памяти оперативная память (ReRAM), основанная на наноструктурах с резистивными переключениями под действием электрического поля, более всего подходит для использования в качестве энергонезависимой памяти благодаря низкому энергопотреблению и возможностям масштабирования. Развитие в последние десятилетия ReRAM доказало, что она обладает высокой скоростью переключения, отличной масштабируемостью, низким напряжением, высокой способностью к переключениям [1–3]. Однако исследования физических механизмов ReRAM все еще недостаточны. Некоторые ключевые научные вопросы нуждаются в дальнейшем изучении и уточнении. Важным направлением является синтез адаптивных систем на основе ReRAM с возможностями обработки информации, аналогичными возможностям биологических нейронных систем.

В последнее время в качестве основы ReRAM выступают двумерные материалы типа окиси графена и подобных ему. В виде монокристаллов они представляют собой двумерные слои, связанные слабым Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием. Мы исследовали микроструктуры на основе сколов монокристаллов $Bi_2Se_3$. Монокристаллы селенида висмута также обладают Ван-дер-Ваальсовыми связями, но через пять сильно связанных атомных плоскостей (квинтипулы). Образцы получали путем расщепления легированных монокристаллов $Bi_2Se_3$ по плоскостям Ван-дер-Ваальсовых связей посредством шелушения флеек (чешуек монокристалла) скотчем с последующим переносом их на нижний электрод из золота и дальнейшим напылением слоя $SiO_2$ (около 20 нм), в котором над флейкой взрывалось (lift off) отверстие диаметром порядка единиц микрон. Далее

изготовлялся верхний электрод из меди, проходящий через отверстие в диэлектрике по верхней поверхности флейки (рис. 1). Рисунок металлизации формировали в редакторе электронного литографа на базе РЭМ EVO-50, оборудованного программно-аппаратным комплексом Nanomaker. Микроструктуры соединялись с парой золотых контактов и с помощью двухточечных измерений изучались их электрические свойства.

Большинство получившихся микроскопических образцов демонстрировало стабильные мемристивные переключения (рис. 1), качественно напоминающие исследованные ранее на макроскопических сколах с механическим контактом [4]. После непрерывных измерений в течение нескольких часов большинство образцов необратимо деградировало. После этих измерений образцы подвергались исследованиям на оптическом, электронном и атомно-силовом микроскопах. В результате на образцах наблюдались разрывы в медном электроде и флейках, какие-то выделения на поверхности микроструктур (рис. 1).

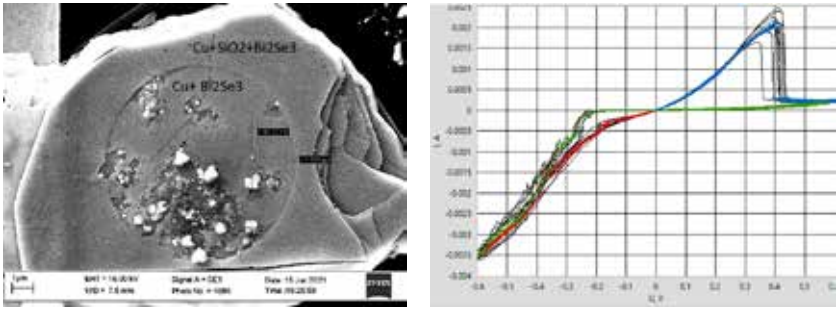



**Рис. 1.** Образец (1) после измерений. Полоса, проходящая по левой части рисунка, — нижний золотой электрод. Круг в центре — область, в которой «взорван» слой $SiO_2$, в ней медный электрод лежит на флейке $Bi_2Se_3$. Справа представлены десять последовательных ВАХ на одном графике

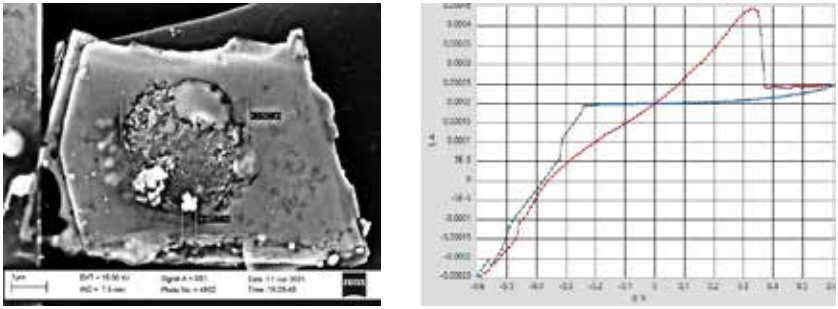


**Рис. 2.** Образец (2), во многом похожий на образец (1). Образцы с подобными характеристиками мы успешно програмировали (т. е., управляя разверткой ВАХ, добивались изменения сопротивления образца) в работе [4], но в этот раз образцы необратимо деградировали после нескольких измерений и подобный эксперимент не удавалось провести полноценно

Таким образом, в работе получены микроконтактные структуры на основе микроскопических флейков селенида висмута, исследованы их мемристивные свойства и параметры БЭРП и показано, что их свойства аналогичны макроскопическим образцам [4].

***Работа поддержана в части государственных заданий Института проблем микроэлектроники и особочистых материалов РАН, а также грантом РФФИ № 19-29-03011 мк.***

***Литература***

1. Waser R., Aono M. Nanoionics-based resistive switching memories // Nature Materials, 6, 833 (2007).
2. Yang J. J., Strukov D. B. Memristive devices for computing // Nat. Nanotechnology, 8, 13, 2013.
3. Pershin Y. V., Ventra M. D. Memory effects in complex materials and nanoscale systems // Advances in Physics, 60, 145, 2011.
4. Zotov A. V., Sirotkin V. V., Il'in A. I. et al. Multilevel memristive structures based on bismuth selenide // Chaos, Solitons & Fractals. Vol. 143. February 2021, 110542.

УДК 621.38-022.532 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.705.706

# Исследование влияния материала нижнего контакта и толщины нанокристаллических пленок ZnO на их резистивное переключение для создания элементов нейроморфных систем

## Research on the Effect of the Bottom Contact and Thickness on Resistive Switching in Nanocrystalline ZnO Films for Neuromorphic Systems

**Томинов Р. В.[1], Шиховцов И. А.[1], Угрюмов И. С.[1], Вакулов З. Е.[2], Смирнов В. А.[1]**
*[1] Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет*
*347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2*
*tominov@sfedu.ru*
*[2] Южный научный центр Российской академии наук*
*344006, г. Ростов-на-Дону, просп. Чехова, 41*

**Tominov R. V.[1], Shikhovtsov I. A.[1], Ugryumov I. S.[1], Vakulov Z. E.[2], Smirnov V. A.[1]**
*[1] Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering, Southern Federal University*
*2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russia*
*tominov@sfedu.ru*
*[2] Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*
*41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russia*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния материала нижнего контакта и размерного эффекта на резистивное переключение в нанокристаллических пленках оксида цинка, полученных методом импульсного лазерного осаждения.
**Ключевые слова:** нанотехнология; нейроморфные системы; ReRAM; резистивное переключение; нанокристаллический оксид цинка.

This research presents the results of experimental studies of the influence of the material of the bottom contact, as well as the size effect on resistive switching in nanocrystalline zinc oxide films grown by pulsed laser deposition.
**Keywords:** nanotechnology; neuromorphic systems; ReRAM elements; resistive switching; nanocrystalline zinc oxide.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния материала нижнего контакта (TiN, Pt, ZnO:In и ZnO:Pd) и размерного эффекта (толщины) на резистивное переключение в нанокристаллических пленках ZnO, выращенных методом импульсного лазерного осаждения. Было показано, что нанокристаллическая пленка ZnO с нижним контактом, выполненным из TiN, имеет наибольшее среди других рассмотренных материалов отношение сопротивлений $R_{HRS}/R_{LRS}$ = 2398,6±163,6, а также достаточно низкие значения напряжений переключения $U_{set}$ = 1,9±0,2 В и $U_{res}$ = −1,3±0,5 В.

Было показано, что увеличение количества лазерных импульсов от 1000 до 5000 приводит к росту толщины нанокристаллической пленки ZnO от 7,2±2,5 до 53,6±18,3 нм, увеличению концентрации электронов от $(1,8\pm0,3)\cdot10^{19}$ до $(5,7\pm0,5)\cdot10^{19}$ см$^{-3}$, уменьшению подвижности электронов от 17,2±1,2 до 1,9±0,5 см$^2$/(В·с), а также к увеличению удельного сопротивления от $(0,31\pm0,03)\cdot10^{-2}$ до $(0,83\pm0,04)\cdot10^{-2}$ Ом·см.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что для структуры TiN/ZnO/W увеличение толщины нанокристаллической пленки ZnO от 7,2±2,5 до 41,2±9,7 нм приводит к увеличению отношения $R_{HRS}/R_{LRS}$ от 294,1±83,8 до 2398,7±163,6 и уменьшению от 2398,7±163,6 до 2255,3±281,7 при увеличении толщины пленки от 41,2±9,7 до 53,6±18,3 нм.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементов ReRAM нейроморфных систем на основе нанокристаллических пленок ZnO.

***Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-79-00216 (в части синтеза и исследования толщины пленок ZnO), грантов РФФИ № 19-29-03041 мк и № 19-38-60052 (в части исследования электрофизических свойств пленок ZnO), а также гранта Президента РФ № МК-6252.2021.4 (в части исследования резистивного переключения пленок ZnO).***

This research presents the results of experimental studies of the influence of the bottom contact material (TiN, Pt, ZnO:In, and ZnO:Pd) and the size effect (thickness) on resistive switching in nanocrystalline ZnO films grown by pulsed laser deposition. A nanocrystalline ZnO film with a bottom contact made of TiN was shown to have the largest resistance ratio $R_{HRS}/R_{LRS} = 2398.6\pm163.6$ among the other materials considered, as well as relatively low switching voltage values $U_{set} = 1.9\pm0.2$ V and $U_{res} = -1.3\pm0.5$ V.

It was shown that an increase in the number of laser pulses from 1000 to 5000 leads to an increase in the thickness of the nanocrystalline ZnO film from 7.2±2.5 nm to 53.6±18.3 nm, an increase in the electron concentration from $(1.8\pm0.3)\cdot10^{19}$ cm$^{-3}$ to $(5.7\pm0.5)\cdot10^{19}$ cm$^{-3}$, a decrease in the electron mobility from 17.2±1.2 cm$^2$/(V·s) to 1.9±0.5 cm$^2$/(V·s), as well as to an increase in resistivity from $(0.31\pm0.03)\cdot10^{-2}$ Ω·cm to $(0.83\pm0.04)\cdot10^{-2}$ Ω·cm.

Analysis of the obtained experimental results showed that for the TiN/ZnO/W structure, an increase in the thickness of the nanocrystalline ZnO film from 7.2±2.5 nm to 41.2±9.7 nm leads to an increase in the $R_{HRS}/R_{LRS}$ ratio from 294.1±83.8 to 2398.7±163.6, and a decrease from 2398.7±163.6 to 2255.3±281.7 with an increase in the film thickness from 41.2±9.7 nm to 53.6±18.3 nm.

The results obtained can be used in the development of technological processes for the manufacture of ReRAM elements based on nanocrystalline ZnO films for neuromorphic systems.

***This research was supported by the Russian Science Foundation Grant № 21-79-00216 (synthesis and study of the thickness of ZnO films), RFBR Grants № 19-29-03041 мк and № 19-38-60052 (study of the electrophysical properties of ZnO films), as well as Grant of the President of the Russian Federation № MK-6252.2021.4 (study of resistive switching of ZnO films).***

УДК 621.396 + 621.372 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.707.708

# Контентно-адресуемая память на основе двухзатворных сегнетоэлектрических транзисторов

## Content-addressable Memory Based on Two-gate Ferroelectric Transistors

**Тарков М. С., к. т. н., Попов В. П., д. ф.-м. н., Леушин А. Н., Тихоненко Ф. В.**
*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*
*tarkov@isp.nsc.ru*

**Tarkov M. S., Ph.D, Popov V. P., Ph.D, Leushin A. N., Tikhonenko F. V.**
*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*

Разработаны компактные модели 2G FeFET-транзисторов с многодоменным переключением сегнетоэлектриков. Модели применялись для эмуляции работы контентно-адресуемой памяти (КАП) в форме кроссбара. Моделирование предложенной реализации КАП подтвердило ее работоспособность.
**Ключевые слова:** 2G FeFET; кроссбар; контентно-адресуемая память.

The paper presents compact models of 2G FeFET transistors with multidomain ferroelectric switching. The models were used to emulate the work of content-addressable memory (CAM) in the crossbar form. Simulation of the proposed CAM implementation has confirmed its performance.
**Keywords:** 2G FeFET; crossbar; content-addressable memory.

Скорость вычислений традиционной компьютерной архитектуры фон Неймана ограничена в первую очередь узким местом на пути передачи данных между памятью и центральным процессором. Одним из решений этой проблемы является устранение разделения между процессором и памятью путем перемещения функций процессора непосредственно в память. Для этих целей память с адресацией по содержанию является идеальным способом стереть различие между запоминанием и обработкой, поскольку каждая ячейка памяти является блоком обработки, способным выполнять функцию EXCLUSIVE-NOR (XNOR).

Разработаны: 1) компактные MVSNC и BSIM4 моделей 2G FeFET-транзисторов с многодоменным переключением сегнетоэлектриков по моделям Ландау—Халатникова и Прейсаха в пакете Verilog-A, 2) аналитическая модель 2G FeFET-транзистора в пакете LTSPICE. Модели проверены на реальных транзисторах и применялись для эмуляции работы выбранной архитектуры контентно-адресуемой памяти (КАП) (ассоциативной памяти Хемминга) в форме кроссбара. Программа моделирования КАП построена на основе симулятора Cadence Virtuoso system и на 2FET-2FeFET-ячейке, реализующей функцию XNOR.

Программа КАП тестировалась на кроссбаре на изображениях символов и их искаженных вариантах. Максимум выходных сигналов кроссбара соответствует правильно распознанным изображениям символов, искаженные изображения также распознаются правильно. Моделирование предложенной реализации ассоциативной (контентно-адресуемой) памяти Хемминга подтвердило ее работоспособность.

***Литература***

1. Tarkov M. S., Leushin A. N., Tikhonenko F. V., Tyschenko I. E., Popov V. P. Logic Elements and Crossbar Architecture Based on SOI Two-Gate Ferroelectric Transistors // International Conference EuroSOI-ULIS 2020, IEEE Express, PDFeXpID6410227, 2020. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9365362.
2. Попов В. П., Антонов В. А., Леушин А. Н., Тихоненко Ф. В., Тарков М. С., Мяконьких А. В., Руденко К. В., Лукичев В. Ф. 2G FeFET транзисторы на КНИ структурах для нейросетевых интегральных схем // XXIV Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 10–13 марта. 2020. — Т. 2. — С. 705–7066. URL: http://nanosymp.ru/ru/accepted-talks.
3. Tarkov M. S. Two-Gate FeFET SPICE Model and Its Application to Construction of Adaptive Adder. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) // 2021, IEEE Express, 2020. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9455091.

The computational speed of traditional von Neumann computer architecture is limited primarily by a bottleneck in the data transfer path between the memory and the central processor. One solution to this problem is to eliminate the separation between processor and memory by moving processor functions directly into memory. For this purpose, content-addressable memory is an ideal way to erase the distinction between storing and processing, since each memory location is a processing unit capable of executing EXCLUSIVE-NOR (XNOR) function.

Compact MVSNC and BSIM4 models of 2G FeFET transistors with multidomain switching of ferroelectrics according to the Landau-Khalatnikov and Preisach models in the Verilog-A package, and an analytical model of the 2G FeFET transistor in the LTSPICE package have been developed. The models were tested on real transistors and used to emulate the operation of the selected content-addressable memory (CAM) architecture (Hamming associative memory) in the form of a crossbar. The CAM simulation program is based on the Cadence Virtuoso system simulator and on a 2FET-2FeFET cell that implements the XNOR function.

The CAM program was tested on a crossbar by character images and their distorted versions.

The crossbar output signals maximum corresponds to correctly recognized image, distorted images are also recognized correctly. Modeling the proposed Hamming's associative (content-addressable) memory implementation has confirmed its performance.

***References***

1. Tarkov M. S., Leushin A. N., Tikhonenko F. V., Tyschenko I. E., Popov V. P. Logic Elements and Crossbar Architecture Based on SOI Two-Gate Ferroelectric Transistors // International Conference EuroSOI-ULIS 2020, IEEE Express, PDFeXpID6410227, 2020. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9365362.
2. Popov V. P., Antonov V. A., Leushin A. N., Tikhonenko F. V., Tarkov M. S., Miakonkikh A. V., Rudenko K. V., Lukichev V. F. 2G FeFET on SOI structures for neural network integrated circuits // XXIV Int. Symp. "Nanophysics and nanoelectronics", Nizhny Novgorod, March 10–13, 2020. Vol. 2. P. 705–706. URL: http://nanosymp.ru/ru/accepted-talks.
3. Tarkov M. S. Two-Gate FeFET SPICE Model and Its Application to Construction of Adaptive Adder // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) 2021, IEEE Express, 2020. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9455091.

УДК 004.076.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.709.710

# Моделирование влияния тепловых процессов на вольт-амперную характеристику биполярного мемристора на основе оксида гафния

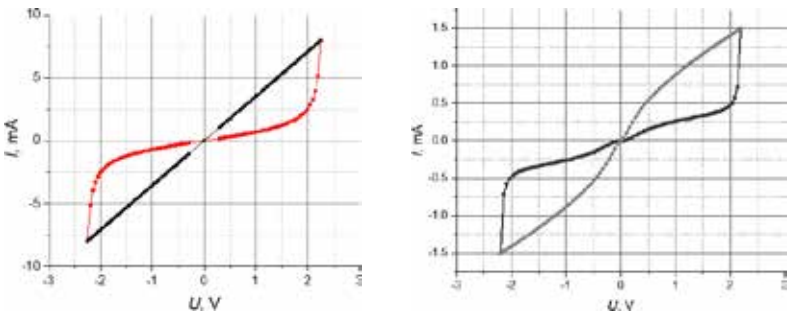
## Modeling the Effect of Thermal Processes on the Volt-ampere Characteristic of Bipolar Membrane Based on Hafnium Oxide

**Алёшин А. Н., Зенченко Н. В., Рубан О. А.**
*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой микроэлектроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)*
*117105, г. Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5*
*Zenchenko.nikolay@yandex.ru*

**Alyoshin A. N., Zenchenko N. V., Ruban O. A.**
*V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences*
*bld. 5, 7 Nagorny Lane, Moscow, 117105, Russia*
*Zenchenko.nikolay@yandex.ru*

Была разработана конечно-элементная модель, позволяющая рассчитывать вольт-амперную характеристику биполярного мемристора на основе оксида гафния $Pt/HfO_2/TiN$, которая отражает как высокоомное, так и низкоомное состояние мемристора. Модель позволяет оценивать связь свойств материалов, входящих в конструкцию мемристора, с его рабочим током, а также учитывает изменение свойств материалов вследствие нагрева.
**Ключевые слова:** мемристоры; твердый электролит; моделирование.

Проведено моделирование работы биполярного мемристора на основе оксида гафния методом конечных элементов при использовании в качестве математического базиса уравнений Максвелла для стационарного случая, а также с учетом влияния тепловых процессов на свойства материалов. Режим работы мемристора состоял




*а* *б*

**Рис. 1.** ВАХ мемристора на основе оксида гафния, полученная в результате моделирования: *а*) без учета влияния тепловых эффектов; *б*) с учетом влияния тепловых эффектов на свойства материалов

из четырех последовательных временных интервалов, соответствующих различным участкам двухполярного сигнала треугольного профиля. ВАХ мемристора имела вид петли гистерезиса, что соответствует известным экспериментальным данным.

Из рисунка видно, что ВАХ имеет форму гистерезиса, т.е. наблюдается несовпадение нисходящей и восходящей ветвей ВАХ. Также наблюдается изменение формы ВАХ, вызванное добавлением в модель свойств материалов, зависящих от температуры. Это позволяет сделать вывод о том, что результат моделирования корректно отображает известные закономерности переключения режима работы мемристора, полученные в [1, 2], и позволяет опираться на него при дальнейшем развитии данной модели.

***Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-03003 МК).***

***Литература***

1. Waser R. et al. Nature Materials, 11, 833–840 (2007).
2. Choi B. G. et al. J. App. Phys., 98, 033715 (2005).

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.711.712

# Усиление фототока в слоях квантовых точек Ge/Si-модами двумерного фотонного кристалла

## Strengthening the Photocurrent in the Layers of Quantum Points of Ge/Si Modes of a Two-dimensional Photonic Crystal

**Двуреченский А. В.[1,2], Якимов А. И.[1,3], Блошкин А. А.[1,2], Кириенко В. В.[1], Уткин Д. Е.[1,2]**

*[1] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН*
*630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*
*dvurech@isp.nsc.ru*
*[2] Новосибирский государственный университет*
*630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1*
*[3] Томский государственный университет*
*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

**Dvurechenskiy A. V., Yakimov A. I., Bloshkin A. A., Kiriyenko V. V., Utkin D. Ye.**

Обнаружено, что встраивание слоев квантовых точек Ge/Si в двумерный фотонный кристалл (ФК) приводит к многократному (до 30 раз) усилению фототока в ближнем ИК-диапазоне, что связывается с возбуждением падающей световой волной планарных мод ФК, взаимодействующих с межзонными переходами в квантовых точках.

**Ключевые слова:** квантовые точки; фотонные кристаллы; фотодетекторы ближнего ИК-диапазона; наноструктуры с захватом фотонов.

Неохлаждаемые фотодетекторы, содержащие в качестве активного элемента гетеростуктуры Ge/Si с квантовыми точками (КТ) Ge, способны регистрировать оптическое излучение в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн (1,2–1,6 мкм), актуальном для волоконно-оптических линий связи. Основное достоинство таких структур заключается в возможности интеграции с кремниевой технологией. Недостаток — низкая чувсивительность вследствие низкой плотности вводимых КТ-состояний и непрямых оптических переходов в таких гетероструктурах. Нами было обнаружено, что интеграция гетероструктур Ge/Si, содержащих слои КТ, с металлическими пленками с субволновыми регулярными решетками отверстий либо с массивами металлических наночастиц на поверхности полупроводника приводит к существенному росту квантовой эффективности в среднем (3–5 мкм) и ближнем (1,2–1,6 мкм) ИК-диапазонах [1] вследствие возбуждения световой волной поверхностных локализованных плазмонных мод или плазмон-поляритонных волн, эффективно взаимодействующих с дипольными переходами в КТ. Недостатками металлических метаповерхностей являются большие омические потери в металле и малая глубина проникновения поля плазмонной волны в полупроводник. Это особенно актуально для более коротких длин волн.

В данной работе предложен подход, в основе которого лежит концепция фотонных кристаллов (ФК). Отличительной особенностью ФК является наличие в материале пространственно-периодической модуляции диэлектрической проницаемости с периодом, сравнимым с длиной волны оптического излучения. В нашем

случае ФК представлял собой периодическую решетку вертикальных отверстий в полупроводнике. Для падающей волны такая структура является дифракционной решеткой, способной поддерживать три основных моды: фундаментальную моду, волноводную и каналирующую [2]. Возбуждение именно этих мод должно усиливать оптическое поглощение в слоях КТ, поскольку они распространяются вдоль слоев КТ, тем самым увеличивая оптический путь.

Гетероструктуры Ge/Si с КТ были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках кремния на изоляторе (КНИ). Толщина слоя $SiO_2$ составляла 155 нм. Наличие захороненного диэлектрического слоя окисла с показателем преломления меньше, чем в кремнии, необходимо для генерации планарных волноводных мод. Активная область детекторов состояла из десяти слоев Ge КТ, разделенных кремниевыми барьерами толщиной 10 нм.

Измерения спектров фототока проводились при комнатной температуре с помощью ИК-Фурье-спектрометра Bruker Vertex 70 в режиме Rapid-Scan с разрешением 30 $см^{-1}$ в комбинации с низкошумящим токовым предусилителем SR 570 компании Stanford Research System. Источником излучения служила галогеновая лампа. Засветка образцов неполяризованным излучением осуществлялась со стороны подложки.

Периодический массив отверстий представлял квадратную решетку с различным диаметром d и периодом p. Для p = 1700 нм и d = 1130 нм усиление фототока в фотонных структурах составило 25 раз на длине волны 1,2 мкм и 34 раза на длине волны 1,6 мкм по сравнению со структурами без отверстий в структуре.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности подхода разработок фотодиодов O-band (1260–1360 нм) и L-band (1565–1625 нм) на основе встраивания квантовых точек Ge/Si в фотонные кристаллы.

***Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00070).***

***Литература***

1. Yakimov A. I., Kirienko V. V., Bloshkin A. A., Dvurechenskii A. V. and Utkin D. E., Near-infrared photoresponse in Ge/Si quantum dots enhanced by localized surface plasmons supported by aluminum nanodisks // J. Appl. Phys. 128, 143101 (2020).
2. Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D. Photoniccrystals: Molding the flow of light. Princeton University Press, Princeton 2008.

УДК 535.8 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.713.716

# Полупроводниковые триггерные генераторы одиночных фотонов в телекоммуникационных спектральных диапазонах для квантовых систем обработки и передачи информации

## Semiconductor Trigger Generators of Single Photons in Telecommunication Spectral Ranges for Quantum Systems of Information Processing and Transmission

**Торопов А. А., д. ф.-м. н., Сорокин С. В., к. ф.-м. н., Климко Г. В., Рахлин М. В., к. ф.-м. н., Седова И. В., к. ф.-м. н., Малеев Н. А., к. ф.-м. н., Блохин С. А., к. ф.-м. н., Васильев А. П., Устинов В. М., чл.-корр. РАН, Кулагина М. М., Задиранов Ю. М., к. ф.-м. н.**
*ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*toropov@beam.ioffe.ru*

**Toropov A. A., Sc.D, Sorokin S. V., Ph.D, Klimko G. V., Rakhlin M. V., Ph.D, Sedova I. V., Ph.D, Maleev N. A., Ph.D, Blokhin S. A., Ph.D, Vasiliev A. P., Ustinov V. M., Kulagina M. M., Zadiranov Yu. M., Ph.D**
*Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia*
*toropov@beam.ioffe.ru*

Разработана базовая технология изготовления полупроводниковых однофотонных генераторов для телекоммуникационных диапазонов. Рассмотрены методы реализации генераторов, интегрирующих лазерный источник накачки и излучающую структуру в исполнении, пригодном для внедрения в реальное производство.
**Ключевые слова:** генераторы одиночных фотонов; квантовые точки; квантовая криптография; вертикально-излучающие лазеры.

The paper highlights the basic technology for the manufacture of semiconductor single-photon generators for telecommunication ranges. Besides, it considers methods for the implementation of generators that integrate a laser pump source and an emitting structure in a design suitable for introducing in real production.
**Keywords:** single photon generators; quantum dots; quantum cryptography; vertical-emitting lasers.

Использование однофотонных генераторов (ОГ) на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) является одним из наиболее перспективных подходов к реализации устройств оптической квантовой связи и квантовых вычислений. Коммерчески доступные ОГ на основе микрорезонаторов с КТ InAs/GaAs обеспечивают достижение беспрецедентно хороших значений основных параметров однофотонного излучения на длине волны 925 нм: «чистота» однофотонного излучения более 95% и степень неразличимости фотонов более 90% при средней частоте генерации фотонов свыше 150 МГц [1]. Тем не менее активное внедрение подобных устройств при разработке квантовых систем защищенной связи и распределенных вычислений сдерживается отсутствием достаточно эффективных ОГ, излучающих

в телекоммуникационных спектральных диапазонах, используемых в оптоволоконных и атмосферных оптических линиях связи.

В течение последних лет в ФТИ им. А. Ф. Иоффе активно разрабатывалась технология изготовления триггерных ОГ на базе фотонных наноантенн и микрорезонаторов с одиночными КТ в системах (Al,Ga,In)As и (Cd,Zn,Mg)(Se,S). Изготавливаемые ОГ работают в диапазоне 500–700 нм, соответствующем окну прозрачности атмосферы, с чистотой однофотонного излучения свыше 90 % при эффективности более 15 % (15 фотонов на 100 импульсов накачки) [2–4], что превосходит мировые достижения в этой области. Разработаны подходы к изготовлению ОГ на базе КТ в системе InAs/InGaAs, излучающих в О-диапазоне (1310 нм) с эффективностью более 10 %. Получен также ряд приоритетных результатов в области разработки вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) различных спектральных диапазонов [5–6]. В рамках совместных исследований, выполненных ОКБ «Планета», ООО «Коннектор Оптикс» и ФТИ им. А. Ф. Иоффе, впервые в России разработана технология ВИЛ телекоммуникационных диапазонов 1310/1550 нм. Импульсные лазеры такого типа могут быть использованы для реализации наиболее эффективной резонансной накачки ОГ на основе КТ.

Выполненные исследования позволяют перейти к стадиям прикладной НИР и ОКР, направленных на оптимизацию микрорезонаторных структур с КТ, а также разработку макетов источников импульсной накачки структур с КТ на основе ВИЛ спектральных диапазонов 1310/1550 нм и подходов, обеспечивающих гибридную интеграцию источников накачки и излучающих структур для создания эффективных компактных ОГ в телекоммуникационных диапазонах. Потенциал промышленных партнеров (ОКБ «Планета» и ООО «Коннектор Оптикс»), привлекаемых для выполнения ОКР, позволит реализовать компактные источники импульсной накачки ОГ на КТ в исполнении, пригодном для внедрения в реальное производство, а также использовать имеющуюся у партнеров технологию стыковки излучателей с оптическим волокном и развитую испытательную базу.

***Литература***


1. https://quandela.com.
2. Rakhlin M. V., Belyaev K. G., Klimko G. V., Mukhin I. S., Kirilenko D. A., Shubina T. V., Ivanov S. V., Toropov A. A. InAs/AlGaAs quantum dots for single photon emission in a red spectral range // Scientific Reports (Nature), 2018. V. 8. P. 5299.
3. Рахлин М. В., Беляев К. Г., Климко Г. В., Седова И. В., Кулагина М. М., Задиранов Ю. М. и др. Эффективный полупроводниковый источник одиночных фотонов красного спектрального диапазона // Письма в ЖЭТФ, 2019. — Т. 109. — № 4. — С. 147–151.
4. Rakhlin M., Sorokin S., Kazanov D., Sedova I., Shubina T., Ivanov S., Mikhailovskii V., Toropov A. Bright Single-Photon Emitters with a CdSe Quantum Dot and Multimode Tapered Nanoantenna for the Visible Spectral Range // Nanomaterials, 2021. V. 11. P. 916.
5. Maleev N. A., Blokhin S. A., Bobrov M. A., Kuz'menkov A. G., Kulagina M. M., Ustinov V. M. Laser Source for a Compact Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope // Gyroscopy Navig., 2018. V. 9. № 3. P. 177–182.

6. Blokhin S.A., Maleev N.A., Bobrov M.A., Kuz'menkov A.G., Vasil'ev A.P. et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers with intracavity contacts and a rhomboidal current aperture for compact atomic clocks // Quantum Electron., 2019. V. 49. № 2. P. 187–190.

The use of single-photon generators (SPGs) based on semiconductor quantum dots (QDs) is one of the most promising approaches to the implementation of optical quantum communication and quantum computing devices. Commercially available SPGs based on microcavities with InAs / GaAs QDs provide unprecedentedly good values of the main parameters of single-photon emission at a wavelength of 925 nm: the "purity" of single-photon emission is more than 95 % and the degree of photon indistinguishability is more than 90 % at an average photon generation frequency of over 150 MHz [1]. Nevertheless, the active introduction of such devices in the development of quantum systems for secure communication and distributed computing is constrained by the lack of sufficiently efficient SPGs emitting in the telecommunication spectral ranges used in fiber-optic and atmospheric optical communication lines.

In recent years a technology for manufacturing trigger SPGs based on photonic nanoantennas and microcavities with single QDs in (Al,Ga,In)As and (Cd,Zn,Mg) (Se,S) systems has been actively developed in Ioffe Institute. The manufactured SPGs operate in the range of 500–700 nm, corresponding to the atmospheric transparency window, with a single-photon emission purity of over 90 % at an efficiency of more than 15 % (15 photons per 100 pump pulses) [2–4], which exceeds world achievements in this area. Approaches to the fabrication of SPGs based on QDs in the InAs/InGaAs system, emitting in the O-diapason (1310 nm) with an efficiency of more than 10 %, have been developed. A number of priority results have also been obtained in the development of vertical-emitting lasers (VCSELs) of various spectral ranges [5–6]. Within the framework of joint research carried out by the OKB Planeta, Connector Optics LLC and Ioffe Institute, for the first time in Russia, the technology of VCSELs for telecommunication ranges of 1310/1550 nm was developed. Pulsed lasers of this type can be used to implement the most efficient resonant pumping of QD-based SPGs.

The performed studies allow us to proceed to the stages of applied research and development work aimed at optimizing microcavity structures with QDs, as well as the development of layouts of pulsed pumping sources for structures with QDs, based on VCSELs of spectral ranges 1310/1550 nm, and approaches that provide hybrid integration of pump sources and emitting structures for the creation of efficient compact SPGs in telecommunication ranges. The potential of industrial partners (OKB Planeta and Connector Optics LLC) involved in the R&D will make it possible to implement compact sources of pulsed SPGs pumping in a design suitable for implementation in real production, as well as to use the technology of joining emitters with optical fiber and a developed test base.

***References***

1. https://quandela.com.
2. Rakhlin M.V., Belyaev K.G., Klimko G.V., Mukhin I.S., Kirilenko D.A., Shubina T.V., Ivanov S.V., Toropov A.A. InAs/AlGaAs quantum dots for single photon emission in a red spectral range // Scientific Reports (Nature), 2018. V. 8. P. 5299.

3. Rakhlin M. V., Belyayev K. G., Klimko G. V., Sedova I. V., Kulagina M. M., Zadiranov Yu. M. et al. Highly Efficient Semiconductor Emitter of Single Photons in the Red Spectral Range // JETP Letters, 2019. V. 109. № 4. P. 145–149.
4. Rakhlin M., Sorokin S., Kazanov D., Sedova I., Shubina T., Ivanov S., Mikhailovskii V., Toropov A. Bright Single-Photon Emitters with a CdSe Quantum Dot and Multimode Tapered Nanoantenna for the Visible Spectral Range // Nanomaterials, 2021. V. 11. P. 916.
5. Maleev N. A., Blokhin S. A., Bobrov M. A., Kuz'menkov A. G., Kulagina M. M., Ustinov V. M. Laser Source for a Compact Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope // Gyroscopy Navig., 2018. V. 9. № 3. P. 177–182.
6. Blokhin S. A., Maleev N. A., Bobrov M. A., Kuz'menkov A. G., Vasil'ev A. P. et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers with intracavity contacts and a rhomboidal current aperture for compact atomic clocks // Quantum Electron., 2019. V. 49. № 2. P. 187–190.

УДК 621.3.049 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.717.719

# Полупроводниковые триггерные эмиттеры одиночных фотонов в солнечно-слепом ультрафиолетовом диапазоне для защищенных космических и атмосферных линий связи

## Semiconductor Trigger Emitters of Single Photons in the Solar-blind Ultraviolet Range for Space and Atmospheric Optical Communication Lines

**Жмерик В. Н., д. ф.-м. н., Европейцев Е. А., Нечаев Д. В., к. ф.-м. н., Семенов А. Н., к. ф.-м. н., Березина Д. С., Кулагина М. М., Шубина Т. В., д. ф.-м. н.**
*ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*jmerik@pls.ioffe.ru*

**Jmerik V. N., Sc.D, Europeitsev E. A., Nechaev D. V., Ph.D, Semenov A. N., Ph.D, Berezina D. S., Kulagina M. M., Shubina T. V., Sc.D**
*Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia*
*jmerik@pls.ioffe.ru*

Исследуется возможность создания высокотемпературных эмиттеров одиночных фотонов для линий связи в солнечно-слепом ультрафиолетовом диапазоне на основе наноколонн с монослойными квантовыми ямами GaN/AlN, полученными с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии и последующего травления.
**Ключевые слова:** эмиттеры одиночных фотонов; оптическая связь; ультрафиолетовый диапазон; монослойные квантовые ямы GaN/AlN; молекулярно-пучковая эпитаксия; наноколонны.

The paper highlights possibilities of creating high-temperature single photons emitters for optical communication lines in the solar-blind ultraviolet range, based on individual site-controlled nanocolumns with monolayer GaN/AlN quantum wells obtained by molecular beam epitaxy and subsequent etching.
**Keywords:** single photon emitters; ultraviolet range; monolayer-thick GaN/AlN quantum wells; molecular beam epitaxy; nanocolumns.

Разработка элементной базы полупроводниковой оптоэлектроники ультрафиолетового (УФ) диапазона на основе широкозонных соединений (Al, Ga)N стала за последнее десятилетие одним из наиболее активно развивающихся направлений науки и промышленности благодаря следующим достоинствам этих приборов:

- уникальные возможности регулирования рабочих длин волн УФ-эмиттеров и фотодетекторов в УФ-диапазоне от 210 до 400 нм, включая солнечно-слепые поддиапазоны с рабочими длинами волн- <290 и <260 нм, для приборов, работающих в атмосферных и космических условиях соответственно [1];
- возможность реализации компактных высокоэффективных квантоворазмерных приборных гетероструктур, включая квантовые ямы, квантовые

точки, квантовые диски с характерными размерами от нескольких нанометров до субмонослойного уровня;
- наличие нескольких развитых технологий изготовления наноколончатых структур на различных подложках (в т. ч. и кремниевых), которые могут использоваться и в качестве эмиттеров одиночных фотонов (ЭОФ);
- высокая энергия связи экситонов в (Al, Ga)-соединениях, что позволяет повышать рабочие температуры ЭОФ вплоть до комнатной;
- повышенная помехозащищенность и возможность, в отличие от видимого и ИК-диапазонов, скрытой непрямой передачи информации;
- рекордные показатели химической, радиационной и термостойкости.

В докладе делается обзор работ ведущих научных групп по развитию ЭОФ в УФ-диапазоне на основе AlGaN квантоворазмерных гетероструктур, полученных различными технологиями. Наряду с достижениями анализируются причины, не позволяющие до сих пор полностью реализовать потенциал этих приборов [2, 3].

Для решения проблем создания ЭОФ в этой области предлагается новый подход на основе нескольких технологий, включая плазменно-активированную молекулярно-пучковую эпитаксию монослойных квантовых ям (дисков) GaN/AlN с толщиной менее 0,5 нм, которые до сих пор успешно развивались нами для создания УФ-эмиттеров мощного спонтанного и когерентного излучений в диапазоне длин волн 235–290 нм [4]. Затем с помощью плазменного и химического анизотропного травления гетероструктур предлагается изготовление УФ-ЭОФ в виде индивидуальных наноколонн с диаметром до нескольких десятков нанометров и высотой до 1 микрона.

Описываются материаловедческие исследования по развитию вышеназванных технологий и приводятся результаты измерений оптических свойства тестовых структур для УФ ЭОФ, полученных с использованием предлагаемых подходов.

***Литература***

1. Guo L. et al. Ultraviolet communication technique and its application // J. Semicond., 2021. V. 42. № 8. 081801.
2. Arakawa Y., Holmes M.J. Progress in quantum-dot single photon sources for quantum information technologies: A broad spectrum overview // Appl. Phys. Rev. 2020. V. 7. 021309.
3. Wang T., Oliver R.A., Taylor R.A. Non-polar nitride single-photon sources // J. Opt., 2020. V. 22. 073001.
4. Jmerik V., Toropov A., Davydov V., Ivanov S. Monolayer-Thick GaN/AlN Multilayer Heterostructures for Deep-Ultraviolet Optoelectronics / Physica status solidi (RRL) // Rapid Research Letters, 2021. URL: https://doi.org/10.1002/pssr.202100242.

The development of the element base semiconductor optoelectronics operating in ultraviolet (UV) range based on wide-band-gap compounds (Al,Ga)N has become over the last decade one of the most actively developing areas of semiconductor optoelectronics due to the following advantages of these devices:
- unique possibilities of regulating the operating wavelength of UV-emitters and photodetectors in the UV range 210–400 nm, including solar-blind subranges with

operating wavelengths <290 and <260 nm, for devices operating in atmospheric and space conditions, respectively [1];

- the possibility of realizing a variety of quantum-size device heterostructures, including quantum wells, quantum dots, quantum disks with characteristic sizes from several nanometers to a submonolayer level (<0.25 nm);
- well-developed technologies for the manufacture of nanocolumnar structures on various substrates (including silicon ones), which can also be used as single photon emitters (SPE);
- high binding energy of excitons in (Al,Ga) compounds, which makes it possible to increase the working temperatures of the SPE up to room temperature;
- high noise immunity and the possibility, in contrast to the devices operating in visible and infrared ranges, of the non-line of sight optical communication;
- record high chemical, radiation and thermal resistances

The paper reviews the work of world-leading scientific groups on the development of SPE in the UV range based on AlGaN quantum-sized heterostructures obtained by various technologies. Along with the achievements, the authors analyze the reasons that still do not allow one to fully realize the potential of these devices [2, 3].

To solve the problems of the implementation of SPEs in this area, a new approach has been proposed, based on several technologies, including plasma-activated molecular beam epitaxy of monolayer GaN/AlN quantum wells (disks) with a thickness of less than 0.5 nm, which we have successfully developed so far to create UV emitters of powerful spontaneous and coherent radiation in the wavelength range 235–290 nm [4]. Then, using plasma and chemical anisotropic etching of heterostructures, it has been proposed to fabricate individual nanocolumns with a diameter of up to several tens of nm and a height of up to 1 micron.

Materials science investigations on the development of the above technologies have been described and the results of up measurements of the optical properties of the first test structures for UV SPE, obtained by us using the proposed approaches, have been presented.

***References***

1. Guo L. et al. Ultraviolet communication technique and its application // J. Semicond., 2021. V. 42. № 8. 081801.
2. Arakawa Y., Holmes M.J. Progress in quantum-dot single photon sources for quantum information technologies: A broad spectrum overview // Appl. Phys. Rev., 2020. V. 7. 021309.
3. Wang T., Oliver R.A., Taylor R.A. Non-polar nitride single-photon sources // J. Opt., 2020. V. 22. 073001.
4. Jmerik V., Toropov A., Davydov V., Ivanov S. Monolayer-Thick GaN/AlN Multilayer Heterostructures for Deep-Ultraviolet Optoelectronics / Physica status solidi (RRL) — Rapid Research Letters // https://doi.org/10.1002/pssr.202100242.

УДК 535.14 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.720.723

# Абсолютная квантовая фотометрия

## Absolute Quantum Photometry

**Кузнецов К. А., Сафроненков Д. А., Прудковский П. А., Леонтьев А. А., Новикова Т. И., Катамадзе К. Г., Борщевская Н. А., Китаева Г. Х.**
*Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова*
*119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, с. 2*
*gkitaeva@physics.msu.ru*

**Kuznetsov K. A., Safronenkov D. A., Prudkovskii P. A., Leontyev A. A., Novikova T. I., Katamadze K. G., Borshevskaya N. A., Kitaeva G. Kh.**
*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*
*1/2 Leninskie Gory, Moscow, 119991*
*gkitaeva@physics.msu.ru*

Разработана процедура обработки данных для измерения нормированной корреляционной функции второго порядка бифотонного поля. Метод Клышко для абсолютной калибровки квантовой эффективности детекторов тестируется как в счетном, так и в аналоговом режиме. Полученные результаты наиболее важны для развития квантовых технологий в длинноволновой области спектра, включая терагерцевый диапазон.
**Ключевые слова:** спонтанное параметрическое рассеяние; квантовая эффективность; метод Клышко.

A data processing procedure has been developed for measuring the normalized second-order correlation function of the biphoton field. The modified Klyshko method for absolute standardless calibration of the quantum efficiency of detectors has been tested in both counting and analog modes. The results obtained are most important for the development of quantum technologies in the long-wavelength region of the spectrum, including the terahertz range.
**Keywords:** spontaneous parametric down-conversion; quantum efficiency; Klyshko's method.

Важнейшим показателем фотодетекторов является их квантовая эффективность. Возможность точной калибровки фотодетектора — необходимое условие для его применения. Методика безэталонной калибровки фотодетекторов, основанная на свойствах спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света, дает возможность измерения квантовой эффективности фотодетектора без сравнения его с эталонным фотодетектором и без использования эталонного источника света с известной спектральной яркостью.

Идея метода безэталонной калибровки фотодетекторов при помощи СПР предложена Д. Н. Клышко [1]. Эталонным источником света в данном случае являются отдельные фотоны. Так как в процессе СПР два фотона рождаются одновременно, два идеальных фотодетектора, регистрирующих их, должны были бы всегда срабатывать синхронно. Поэтому в случае неидеальных фотодетекторов их квантовая эффективность может быть найдена из соотношения между частотой регистрации фотонов каждым из них и частотой их синхронного срабатывания.

Экспериментальные схемы безэталонной квантовой калибровки детекторов разрабатывались в России в МГУ имени М. В. Ломоносова [2]. В дальнейшем к этой теме присоединились исследователи из других научных лабораторий, в частности из метрологических институтов России, США и Италии. Изначально метод безэталонной калибровки был предложен для фотодетекторов, работающих в режиме счета фотонов. При использовании детекторов, работающих в аналоговом режиме, значение фототока является случайной величиной, среднее значение которой пропорционально интенсивности падающего на него света. Однако и в этом случае при условии низкого уровня интенсивности света метод безэталонной калибровки позволяет определить среднее значение квантовой эффективности фотодетектора [3]. Идея использования метода квантовой калибровки в применении к детекторам излучения терагерцевого диапазона до сих пор не реализована. Техника генерации и приема отдельных фотонов терагерцевого диапазона частот в целом пока находится на начальной стадии.

Мы разработали новую процедуру обработки данных для измерения аналоговыми фотодетекторами нормированной корреляционной функции второго порядка бифотонных полей оптического диапазона. На всех этапах мы сравнивали определенные значения квантовой эффективности одного из однофотонных детекторов с соответствующими результатами обычного метода счета фотонов. Экспериментальная схема работает с двумя модулями-интеграторами, которые одновременно определяют фототоки от детекторов сигнального и холостого излучения. Эти токи на самом деле являются результатом усреднения за малое время строба. Показано, что это время соответствует временному окну схемы совпадений в подходе счета фотонов. Исходя из анализа статистических распределений показаний (гистограмм) однофотонных лавинных фотодиодов (ЛФД) и аналоговых фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), предложены процедуры дискриминации для каждого типа детекторов. Экспериментально показано, что дискриминация показаний ЛФД не влияет на значение его квантовой эффективности, измеренной при наличии аналогового ФЭУ в противоположном канале СПР. Полученные результаты будут наиболее актуальны в приложениях квантовых технологий на основе СПР в длинноволновых спектральных диапазонах, где сложно использовать однофотонные детекторы хотя бы в одном канале квантово-коррелированного бифотонного поля.

***Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-12-01134.***

***Литература***

1. Клышко Д. Н. Об использовании двухфотонного света для абсолютной калибровки фотоэлектрических детекторов // Квантовая электроника, 1980 — Т. 7. — № 9. — С. 1932–1940.
2. Penin A. N., Sergienko A. V. Absolute standardless calibration of photodetectors based on quantum two-photon fields // Applied Optics, 1991. V. 30. P. 3582.
3. Meda A., Ruo-Berchera I., Degiovanni I. P., Brida G., Rastello M. L., Genovese M. Absolute calibration of a charge-coupled device camera with twin beams // Applied Physics Letters, 2014. V. 105. P. 101113.

The most important characteristic of photodetectors is their quantum efficiency. The ability to calibrate precisely the photodetector is a prerequisite for its use. The technique of absolute standardless calibration of photodetectors, based on the properties of spontaneous parametric down-conversion (SPDC), makes it possible to measure the quantum efficiency of a photodetector without comparing it with a reference photodetector and without using a reference light source with a known spectral brightness.

The idea of an absolute standardless calibration method for photodetectors using the SPDC was proposed by D. N. Klyshko [1]. The reference light source in this case is individual photons. Since in the SPDC process two photons are born simultaneously, two ideal photodetectors registering them should always work synchronously. Therefore, in the case of non-ideal photodetectors, their quantum efficiency can be found from the ratio between the frequency of photo-counts by each of them and the frequency of their synchronous coincidence. Experimental schemes for the absolute standardless quantum calibration of detectors were developed in Russia at the Lomonosov Moscow State University [2]. Afterwards this topic was joined by researchers from other scientific laboratories, in particular, from the metrological institutes of Russia, the USA and Italy. Initially, the absolute standardless calibration method was proposed for photodetectors operating in the photon-counting mode. When using detectors operating in analog mode, the photocurrent value is a random value, whose average value is proportional to the intensity of the light incident on it. However, even in this case, under the condition of a low level of light intensity, the method of absolute standardless calibration allows one to determine the average value of the quantum efficiency of the photodetector [3]. The idea of using the quantum calibration method as applied to terahertz radiation detectors has not yet been realized. The technique of generation and detection of single photons in the terahertz frequency range as a whole is still at its initial stage.

We have developed a new data processing procedure for measuring the normalized second-order correlation function of biphoton fields in the optical range with analog photodetectors. At all stages, we compared the determined values of the quantum efficiency of one of the single-photon detectors with the corresponding results of the conventional photon counting method. The experimental circuit works with two integrator modules, which simultaneously determine the photocurrents from the signal and idle radiation detectors. These currents are actually the result of averaging over a short strobe time. It has been shown that this time corresponds to the time window of the coincidence circuit in the photon counting approach. From the analysis of the statistical distributions of readings (histograms) of single-photon avalanche photodiodes (APD) and analog photomultiplier tubes (PMTs), discrimination procedures have been proposed for each type of detectors. It has been shown experimentally that discrimination of APD readings does not affect the value of its quantum efficiency, measured in the presence of an analog PMT in the opposite channel of the SPDC. The results obtained will be most relevant in applications of quantum technologies based on SPDC in long-wavelength spectral ranges, where it is difficult to use single-photon detectors in at least one channel of a quantum-correlated biphoton field.

***This work was done under financial support of the Russian Science Foundation (Grant № 17-12-01134).***

***References***

1. Klyshko D. N. Ob ispolzovanii dvuhfotonnogo sveta dlya absolyutnoi kalibrovki fotoelektricheskih detektorov // Kvantovaya elektronika, 1980. V 7. № 9. P. 1932–1940 (In Russian).
2. Penin A. N., Sergienko A. V. Absolute standardless calibration of photodetectors based on quantum two-photon fields // Applied Optics, 1991. V. 30. P. 3582.
3. Meda A., Ruo-Berchera I., Degiovanni I. P., Brida G., Rastello M. L., Genovese M. Absolute calibration of a charge-coupled device camera with twin beams // Applied Physics Letters, 2014. V. 105. P. 101113.

УДК 621.315.592 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.724.726

# Детекторы одиночных фотонов для квантовых коммуникаций

## Single Photons Detectors for Quantum Communications

**Рябцев И. И., д. ф.-м. н., член-корр. РАН, Преображенский В. В., к. ф.-м. н., Чистохин И. Б., к. ф.-м. н., Путято М. А., к. ф.-м. н., Валишева Н. А., к. х. н., Емельянов Е. А., Петрушков М. О., Плешков А. С., Третьяков Д. Б., к. ф.-м. н., Неизвестный И. Г., д. ф.-м. н., член-корр. РАН, Латышев А. В., д. ф.-м. н., ак. РАН**

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*
*ryabtsev@isp.nsc.ru*
*Новосибирский государственный университет*
*630090, г. Новосибирск ул. Пирогова, 2*

**Ryabtsev I. I., Sc.D, Corresponding Member of RAS, Preobrazhenskiy V. V., Ph.D, Chistokhin I. B., Ph.D, Putyato M. A., Ph.D, Valisheva N. A., Ph.D, Yemel'yanov Ye. A., Petrushkov M. O., Pleshkov A. S., Tret'yakov D. B., Ph.D, Neizvestnyy I. G., Sc.D, Corresponding Member of RAS, Latyshev A. V., Sc.D, Academician of RAS**

Для практической реализации квантовых коммуникаций требуются высокоэффективные детекторы одиночных фотонов. Оптимальным выбором являются полупроводниковые лавинные фотодиоды (ЛФД), работающие в гейгеровском режиме. В докладе обсуждается необходимость создания российских ЛФД для квантовых систем связи.

**Ключевые слова:** квантовые коммуникации; одиночные фотоны; детекторы; лавинный фотодиод; гейгеровский режим.

Основной задачей квантовой криптографии является передача секретной информации посредством квантовых объектов — одиночных фотонов, при этом абсолютная секретность передачи обеспечивается законами квантовой механики: одиночные фотоны не могут быть перехвачены и измерены с абсолютной достоверностью [1]. С помощью одиночных фотонов в квантовом канале (оптоволоконной или атмосферной линии связи) генерируется только секретный двоичный ключ, который затем однократно используется отправителем и получателем в симметричной криптосистеме, а само зашифрованное сообщение может передаваться по любому открытому каналу [2–4]. За рубежом уже разработаны коммерческие образцы оптоволоконных квантово-криптографических систем связи [5].

Для полной секретности генерации квантового ключа требуется наличие не более одного фотона в каждом лазерном импульсе, поэтому к фотодетекторам приемного узла предъявляются высокие требования. Они должны обладать высокой квантовой эффективностью регистрации, малыми шумами и достаточно высокой скоростью счета фотонов [2]. В качестве детекторов одиночных фотонов могут применяться фотоэлектронные умножители, полупроводниковые лавинные фотодиоды, а также сверхпроводниковые тонкопленочные детекторы, работающие вблизи перехода в сверхпроводящее состояние. Основными требованиями к детекторам одиночных фотонов в оптоволоконных квантовых линиях связи являются:

высокая квантовая эффективность (>20 %) в спектральном диапазоне 1,3–1,5 мкм, большое внутреннее усиление (>1000), низкий уровень темновых шумов (<50 кГц), достаточно высокое быстродействие, малые размеры и низкое энергопотребление.

Фотоумножители имеют высокое усиление и низкий уровень шумов, однако их квантовая эффективность невелика (<10 %). Сверхпроводниковые детекторы хорошо удовлетворяют всем требованиям, однако требуют охлаждения до гелиевых температур [6] и поэтому несовместимы с компактными автономными однофотонными системами связи. Оптимальным выбором являются полупроводниковые лавинные фотодиоды (ЛФД), имеющие достаточно высокую квантовую эффективность (20–40 %), внутреннее усиление >1000 и уровень шумов <10 кГц при их охлаждении термоэлектрическими микрохолодильниками Пельтье. Для счета одиночных фотонов ЛФД включают в так называемом гейгеровском режиме [7, 8], когда на короткое время прикладывают обратное напряжение смещения, превышающее напряжение пробоя. Пришедший в это время фотон с некоторой вероятностью, зависящей от квантовой эффективности, может вызвать лавинный пробой ЛФД, что порождает импульс тока на его выходе. После срабатывания ЛФД лавину затем необходимо быстро остановить, чтобы он был готов к приему следующего фотона. Это делается с помощью активного или пассивного гашения лавины.

Лавинные фотодиоды для оптоволоконных квантовых коммуникаций в настоящее время производятся только за рубежом. Они выпускаются серийно и имеют длительный срок службы. Основными производителями являются компании WOORIRO Co., Ltd. (Южная Корея), Micro Photon Devices (Италия) и The RMY Electronics (Гонгконг) [9]. Основной отличительной особенностью данных ЛФД является предельно низкий обратный темновой ток ($<10^{-10}$ А) при рабочих температурах 210–230 К.

Для создания и внедрения российских систем однофотонной квантовой связи требуется организовать разработку и производство аналогичных ЛФД в России. Нами в течение последних лет выполняются роботы по конструированию, изготовлению и исследованию опытных образцов таких ЛФД, имеющих параметры не хуже, чем у зарубежных аналогов. К настоящему времени изготовлено несколько партий чипов ЛФД, осуществлено их корпусирование и начаты измерения их параметров в различных режимах работы. Отметим, что детекторы одиночных фотонов на спектральный диапазон 1,3–1,5 мкм востребованы также для других применений (биология, разбраковка интегральных схем, лидарные системы и т. д.), в которых требуется регистрация предельно низких световых потоков.

***Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).***

***Литература***

1. Wooters W. K., Zurek W. H. A single quantum cannot be cloned // Nature. 1982. 299. P. 802–803.
2. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum Cryptography // Rev. of Mod. Phys. 2002. 74. Issue 1. P. 145–175.
3. Рябцев И. И., Бетеров И. И., Третьяков Д. Б., Энтин В. М., Курочкин В. Л., Зверев А. В., Неизвестный И. Г. Экспериментальная квантовая информатика с одиночными атомами и фотонами // Вестник РАН, 2013. 83. № 7. — С. 606–615.

4. Рябцев И. И., Третьяков Д. Б., Коляко А. В., Плешков А. С., Энтин В. М., Неизвестный И. Г., Латышев А. В., Асеев А. Л. Элементная база квантовой информатики II: квантовые коммуникации с одиночными фотонами // Микроэлектроника, 2017. 46. № 2. — С. 131–141.
5. http://www.idquantique.com; http://www.magiqtech.com; https://www.qinetiq.com.
6. Gol'tsman G.N., Okunev O., Chulkova G., Lipatov A., Semenov A., Smirnov K., Voronov B., Dzardanov A. Picosecond superconducting single-photon optical detector // Appl. Phys. Lett. 2001. 79. P. 705–707.
7. Ghioni M., Cova S., Zappa F., Samori C. Compact active quenching circuit for fast photon counting with avalanche photodiodes // Rev. Sci. Instr. 1996. 67. № 10. P. 3440–3448.
8. Cova S., Ghioni M., Laciata A. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection / // Applied optics. 1996. 35. № 12. P. 1956–1976.
9. http://www.wooriro.com; http://www.micro-photon-devices.com; http://www.rmyelectronics.com.

УДК 621.315.592 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.727.730

# Конструкция и технология изготовления детектора одиночных фотонов на базе лавинного фотодиода InP / InGaAs / InP для квантовых коммуникаций

## Design and Fabrication Technology of a Single Photon Detector Based on an InP / InGaAs / InP Avalanche Photodiode for Quantum Communications

**Преображенский В. В., к. ф.-м. н., Чистохин И. Б., к. ф.-м. н., Путято М. А., к. ф.-м. н., Валишева Н. А., к. х. н., Емельянов Е. А., Петрушков М. О., Плешков А. С., Неизвестный И. Г., д. ф.-м. н., член-корр. РАН, Рябцев И. И., д. ф.-м. н., член-корр. РАН, Латышев А. В., д. ф.-м. н., ак. РАН**
*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*
*pvv@isp.nsc.ru*

**Preobrazhenskii V. V., Ph.D, Chistokhin I. B., Ph.D, Putyato M. A., Ph.D, Valisheva N. A., Ph.D, Emelyanov E. A., Petrushkov M. O., Pleshkov A. S., Neizvestny I. G., Sc.D, Corresponding Member of RAS, Ryabtsev I. I., Sc.D, Corresponding Member of RAS, Latyshev A. V., Sc.D, Academician of RAS**
*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*
*pvv@isp.nsc.ru*

Разработан и изготовлен детектор одиночных фотонов на базе лавинных фотодиодов (ОЛФД) InP / InGaAs / InP, работающих на длине волны 1550 нм. Приведено описание конструкции, способа получения гетероструктуры и изготовления чипа ОЛФД. Представлены предварительные результаты измерений параметров изготовленных ОЛФД.
**Ключевые слова:** детектор одиночных фотонов; лавинный фотодиод; гейгеровский режим; гетероструктура; InP / InGaAs / InP; молекулярно-лучевая эпитаксия; избирательное легирование.

A single-photon detector based on InP / InGaAs / InP avalanche photodiodes (SPAD) operating at a wavelength of 1550 nm has been developed and manufactured. The description of the design, the method of obtaining the heterostructure and the manufacturing of the SPAD chip is given. Preliminary results of measurements of SPAD parameters are presented.
**Keywords:** single-photon detector; avalanche photodiode; Geiger mode; heterostructure; InP / InGaAs / InP; molecular beam epitaxy; selective doping.

Однофотонные лавинные фотодиоды (ОЛФД) на основе гетероструктуры InP / InGaAs / InP обеспечивают поглощение фотонов на длине волны 1,55 мкм и применяются в волоконно-оптических линиях связи для реализации систем однофотонной квантовой криптографии.

Для создания ОЛФД нами были проведены следующие работы: разработка конструкции и проектирование топологии ОЛФД на основе гетероструктуры

InP/InGaAs/InP, технологического маршрута его изготовления методами планарной технологии, способа и условий проведения локальной диффузии цинка в целях получения заданного профиля распределения примеси p-типа и толщины области лавинного умножения, методов контроля параметров отдельных слоев гетероструктуры и ОЛФД в целом.

Многослойная гетероструктура в совокупности с локальной диффузией Zn, металлизацией и диэлектрическими слоями состоит из следующих частей:

- тыльная сторона сильно легированной подложки $n^+$-InP с контактом;
- $n^+$-InP буферный слой толщиной 1 мкм и с концентрацией примеси $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$;
- поглощающий i-слой $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ толщиной 1–1,5 мкм с концентрацией примеси $<10^{15}$ см$^{-3}$;
- слой градиентного состава *i*-$In_{0,53}(Ga_xAl_{1-x})_{0,47}As$ толщиной 20–50 нм с концентрацией примеси $1–5 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$;
- n-InP-слой (charge) толщиной 200 нм с концентрацией примеси $1–2 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ для создания перепада электрического поля;
- i-слой InP толщиной 3,5 мкм с концентрацией примеси $<10^{15}$ см$^{-3}$;
- $p^+$-легированная локально область в i-слое InP диаметром 20 мкм, создаваемая диффузией Zn через окно $SiO_2$. После создания легированной $p^+$-области толщина области лавинного умножения составит 0,3–1,0 мкм;
- кольцевая металлизация Ti/Pt/Au к $p^+$-области, создающая контакт.

Гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке $n^+$-InP. Основными параметрами, определяющими работоспособность ОЛФД в гейгеровском режиме как детектора одиночных фотонов, являются квантовая эффективность счета (требуется 15–25 %), частота темновых импульсов (требуется менее 50 кГц) и коэффициент послепульсаций (требуется менее 15 %).

Для достижения предельных параметров ОЛФД, работающих в счетном режиме, требуются рекордно малые темновые токи при обратных напряжениях смещения вблизи напряжения пробоя. Для этого необходима минимизация уровня фоновых примесей в слоях гетероструктуры (пп. 3 и 6 выше). Были проведены исследования влияния условий выращивания этих слоев на уровень фоновых примесей и дефектов в них с помощью сочетания методов C-V-измерений ртутного зонда и МДП-структуры с послойным травлением эпитаксиальных слоев. В докладе обсуждаются результаты проведенных исследований.

Для характеризации работоспособности чипов ОЛФД в гейгеровском режиме был разработан и изготовлен временный корпус, в котором чип устанавливается на позицию измерения с применением прижимных контактов. Конструкция корпуса позволяет оперативно проводить герметизацию, охлаждение чипа до рабочей температуры (217 K) и измерение параметров чипа (квантовой эффективности счета, частоты темновых импульсов и коэффициента послепульсаций) при засветке лазерным излучением через оптоволокно.

Достигнутые в наших образцах ОЛФД величины темнового тока при температуре 217 K вблизи напряжения пробоя (менее $10^{-11}$ А), коэффициента лавинного умножения (25–30) в линейном режиме и частоты темнового счета (менее 50 кГц при перенапряжении до 3,5 В) в режиме Гейгера не уступают результатам мирового уровня.

*Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).*

Single-photon avalanche photodiodes (SPAD) based on the InP/InGaAs/InP heterostructure provide absorption of photons at a wavelength of 1550 nm and are used in fiber-optic communication lines to implement single-photon quantum cryptography systems.

To create the SPAD, we carried out the following work: development of the structure and design of the topology of the SPAD based on the InP/InGaAs/InP heterostructure, the technological route of its manufacturing using planar technology methods, the method and conditions for local zinc diffusion in order to obtain a given p-type impurity distribution profile and the thickness of the avalanche multiplication region, methods for controlling the parameters of individual layers of the heterostructure and SPAD as a whole.

A multilayer heterostructure in combination with local diffusion of Zn, metallization and dielectric layers consists of the following parts:

- the back side of a heavily doped n+-InP substrate with a contact;
- n+-InP buffer layer 1 μm thick and with an impurity concentration of $5 \cdot 10^{18}$ $cm^{-3}$;
- absorbtion i-layer $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 1–1,5 μm thick with impurity concentration $<10^{15}$ $cm^{-3}$;
- a layer of gradient composition *i*-$In_{0,53}(Ga_xAl_{1-x})_{0,47}As$ with a thickness of 20–50 nm with an impurity concentration of $1–5 \cdot 10^{15}$ $cm^{-3}$;
- n-InP layer (charge) 200 nm thick with an impurity concentration of $1–2 \cdot 10^{17}$ $cm^{-3}$ to create an electric field drop;
- i-layer InP with a thickness of 3.5 microns with an impurity concentration $<10^{15}$ $cm^{-3}$;
- p+ locally doped region in the i-layer of InP with a diameter of 20 μm, created by diffusion of Zn through the $SiO_2$ window. After creating the doped p+-region, the thickness of the avalanche multiplication region will be 0.3–1,0 μm;
- annular metallization of Ti/Pt/Au to the p+-region, creating a contact.

The heterostructures were grown by molecular beam epitaxy on an n+InP substrate. The main parameters that determine the operability of the SPAD in the Geiger mode as a single photon detector are the quantum counting efficiency (photon detection efficiency — PDE) (15–25% required), the dark pulse frequency (less than 50 kHz required), and the afterpulsation coefficient (less, than 15% required).

To achieve the ultimate parameters of SPAD operating in the counting mode, record low dark currents are required at reverse bias voltages near the breakdown voltage. For this purpose, it is necessary to minimize the level of background impurities in the layers of the heterostructure (items 3 and 6 above). We investigated the influence of the growing conditions of these layers on the level of background impurities and defects in them using a combination of a mercury probe C-V measurements methods and an MIS structure with layer-by-layer etching of epitaxial layers. The results of the research carried out are discussed.

To characterize the operability of the SPAD chips in the Geiger mode, a temporary housing was developed in which the chip is installed at the measurement position using clamping contacts. The design of the case allows for prompt sealing, cooling of the chip to an operating temperature (217 K) and measuring the parameters of the chip (PDE, Dark Current Rate (DCR) and the afterpulsation coefficient) when illuminated by laser radiation through an optical fiber.

The values of the dark current achieved in our SPAD at a temperature of 217 K near the breakdown voltage (less than $10^{-11}$ A), the avalanche multiplication coefficient (25–30) in the linear mode, and the DCR (less than 50 kHz at overvoltage up to 3,5 V) in the Geiger mode are not inferior to world-class results.

***This work was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).***

УДК 535.4 + 539.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.731.732

# Квантовые сенсоры на особых точках

## Exceptional Point Based Quantum Sensors

**Горбацевич А. А.**[1,2,3], **Шубин Н. М.**[1,2,3]
[1] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
*119991, г. Москва, Ленинский просп., 53*
[2] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
[3] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*gorbatsevichaa@lebedev.ru*

**Gorbatsevich A. A.**[1,2,3], **Shubin N. M.**[1,2,3]
[1] *Lebedev Physical Institute of the RAS*
*53 Leninskiy Ave., Moscow, 119991*
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[3] *National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*gorbatsevichaa@lebedev.ru*

Рассмотрено современное состояние исследований сенсоров на особых точках открытых квантовых систем. Детектируемое внешнее воздействие приводит к корневому изменению параметров системы в отличие от линейного в обычных сенсорах. В качестве возможной реализации предложены молекулярные квантовые сенсоры.
**Ключевые слова:** особая точка; квантовый сенсор; открытые квантовые системы; молекулярная электроника.

The paper reviews the current state of research of sensors at exceptional points of open quantum systems. The external influence leads to a square root change in the system's parameters, in contrast to the linear one in conventional sensors. Molecular quantum sensors have been proposed as a possible implementation.
**Keywords:** exceptional point; quantum sensor; open quantum systems; molecular electronics.

Квантовые сенсоры используют дискретные состояния замкнутых квантовых систем, параметры которых изменяются линейно по величине слабого внешнего воздействия. Недавно было предложено использовать открытые квантовые системы вблизи их особых точек (ОТ). Внешнее воздействие нарушает ОТ, а параметры при этом изменяются существенно сильнее — корневым образом [1]. ОТ присущи также классическим электромагнитным системам, где они стали предметом активного экспериментального изучения [2]. Однако в рамках простой двухуровневой модели было показано, что точность сенсора вблизи ОТ не лучше, чему у обычного [3]. Тем самым, следует различать чувствительность сенсора, которая и служит основной характеристикой сенсора, и величину реакции параметров системы, которая вблизи ОТ может быть велика.

В докладе представлено современное состояние исследований квантовых сенсоров на основе ОТ. Показано, что результат [3] связан с рассмотрением специального случая, когда внешнее воздействие играет роль источника в динамическом уравнении эволюции, т.е. непосредственно он неприменим для электронных систем. В качестве возможной реализации электронных квантовых сенсоров предложены молекулярные структуры, ОТ в которых были описаны в недавней работе [4]. В докладе описано применение методов дизайна резонансных структур, разработанных ранее для электронных волноводов и молекулярных проводников, к оптическим системам и сенсорам на их основе.

***Работа выполнена при поддержке РНФ (21-19-00808) и Министерства науки и высшего образования РФ (075-03-2020-216, код 0719-2020-0017).***

***Литература***

1. Wiersig J. Enhancing the sensitivity of frequency and energy splitting detection by using exceptional points: application to microcavity sensors for single-particle detection // Physical Review Letters, 2014. V. 112. № 20. P. 203901.
2. Wang H. et al. Petermann-factor sensitivity limit near an exceptional point in a Brillouin ring laser gyroscope // Nature communications, 2020. V. 11. № 1. P. 1–6.
3. Langbein W. No exceptional precision of exceptional-point sensors // Physical Review A, 2018. V. 98. № 2. P. 023805.
4. Shubin N. et al. Interacting resonances and antiresonances in conjugated hydrocarbons: exceptional points and bound states in the continuum // Physical Chemistry Chemical Physics, 2021.

Quantum sensors utilize discrete states of closed quantum systems, whose parameters change linearly with the weak external influence. Recently, it has been proposed to use open quantum systems near exceptional points (EP) as sensors. External influence deviates the system from the EP, and parameters change significantly more strongly — in a square root manner [1]. EPs are also inherent in classical electromagnetic systems, where they are under active experimental study [2]. However, within the framework of a simple two-level model, it was shown that the sensitivity of the sensor near EP is no better than that of the conventional one [3]. Thus, one should distinguish between the sensitivity of the sensor, which serves as the main characteristic of the sensor, and the magnitude of the response of the parameters of the system — responsivity, which can be large near EP.

The report presents the current state of research on quantum sensors based on EP. It has been shown that the result of Ref. [3] is related to the consideration of a specific case when an external influence plays the role of a source in the dynamic equation of evolution, i.e. it is not directly applicable to electronic systems. As a possible implementation of electronic quantum sensors, molecular structures have been proposed, in which EPs were described in the recent work [4]. The report describes the application of methods for the design of resonant structures, developed earlier for electronic waveguides and molecular conductors, to optical systems and sensors based on them.

***We acknowledge the RSF (21-19-00808) and the Ministry of Science and Higher Education (075-03-2020-216, code 0719-2020-0017) for support.***

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.733.734

# Элементная база высокотемпературной квантовой сенсорики и фотоники на основе атомарных и атомоподобных квантовых систем

## Elemental Base of High-temperature Quantum Sensory and Photonics Based on Atomic and Atom-like Quantum Systems

**Анисимов А. Н., Баранов П. Г., Вершовский А. К.**
*ФТИ имени А. Ф. Иоффе РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*

**Anisimov A. N., Baranov P. G., Vershovskiy A. K.**
*Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021*

Элементная база на основе атомарных и атомоподобных квантовых систем используется для изготовления квантовых сенсоров, гироскопов, квантовых микросхем, фотонных структур. Разработка таких устройств является стратегической и напрямую связана с практическим применением современных квантовых технологий.

В последние 30 лет область практического применения квантовых систем быстро развивается и насчитывает уже большое количество атомарных и атомоподобных спиновых центров, применимых для изготовления квантовых сенсоров, гироскопов, квантовых микросхем, фотонных структур. Требования к качеству и размеру квантовых сенсоров быстро прогрессирует и приводят к применению новых технологий и принципов в процессе их реализации. Самыми передовыми квантовыми системами на сегодняшний день считаются холодные ионы в ловушках и сверхпроводящие твердотельные схемы, небольшие прототипы которых, состоящие из десятков квантовых битов, уже выполняют квантовые алгоритмы и протоколы. Такие системы не работают в условиях нашей окружающей среды, что в первую очередь мешает их массовому применению. В виду этого все более перспективными становятся квантовые системы, способные работать при более высоких, вплоть до комнатных, температурах. Одним из материалов, в которых это возможно, является соединение кремния и углерода в виде карбида кремния. Помимо технологической доступности данного материала, он еще обладает свойством политипизма кристаллической структуры, что расширяет возможности инжиниринга квантовых структур.

В карбиде кремния существует целый ряд собственных вакансионных центров, обладающих необходимыми спиновыми свойствами для практической реализации квантовых и фотонных устройств. Первой такой системой являются дивакансионные центры, обладающие спином $S = 1$ и спектральной областью излучения в ИК-диапазоне 1,1–1,5 мкм. Второй системой является вакансия кремния (V-центры) со спином $S = 3/2$ и спектральной областью излучения в ближнем ИК-диапазоне 850–960 нм. Обе системы являются на сегодняшний день перспективными (наравне с NV-центрами в алмазе, вакансией бора в h-BN) ввиду уникального свойства оптического выстраивания спиновых подуровней при высоких температурах (от 10

до 400 K). За счет оптического выстраивания спиновой системы и длительного времени когерентности спиновых состояний возможно разрабатывать различные квантовые протоколы на базе импульсных методов оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). При этом разработка резонаторов и фотонных кристаллов на основе эпитаксиальных слоев SiC технологически доступна и успешно продемонстрирована. В связи с этим стратегически важным становится развитие технологии эпитаксиального роста SiC, которая позволит: создать слои с модифицированным изотопным составом углерода и кремния, снизить концентрацию одиночных вакансий до минимально возможного значения, на порядки снизить легирующие примеси, влияющие на когерентные свойства центров окраски.

Квантовые сенсоры на основе атомоподобных структур, таких как центры окраски в кристаллах, имеют ряд потенциальных преимуществ перед сенсорами на тепловых атомах; среди этих преимуществ прежде всего следует упомянуть малые размеры и связанное с ними высокое (субмиллиметровое и даже нанометровое) пространственное разрешение. В то же время сенсоры на тепловых атомах (на атомах щелочных металлов с оптической накачкой) при миллиметровых размерах характеризуются непревзойденной чувствительностью; поэтому весьма перспективной представляется разработка комплексных систем, объединяющих преимущества обоих типов датчиков. Такие системы в первую очередь могут найти применение в наиболее актуальных и сложных задачах нашего столетия, а именно задачах исследования нейроактивности человеческого мозга.

УДК 535.8 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.735.736

# Оптические волноводы в ниобате лития: от модуляторов для распределения ключа до квантовых фотонных интегральных схем

## Optical Waveguides in Lithium Niobate: from Key Distribution Modulators to the Quantum Photonic Integrated Circuits

**Шамрай А. В., Ильичев И. В., Усикова А. А., Агрузов П. М., Лебедев В. В.**
*ФТИ им. А. Ф. Иоффе*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*
*achamrai@mail.ioffe.ru*

**Shamray A. V., Il'ichev I. V., Usikova A. A., Agruzov P. M., Lebedev V. V.**
*Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia*
*achamrai@mail.ioffe.ru*

Представлены оригинальные разработки в области интегральной оптики на подложках ниобата, начиная с традиционных высокочастотных модуляторов для систем квантовой криптографии и заканчивая демонстрацией отдельных компонентов квантовых фотонных интегральных схем.
**Ключевые слова:** квантовая фотоника; интегральная оптика; нобат лития; электрооптические модуляторы.

В настоящее время все еще не определена лидирующая технология для создания компонентной базы квантовой фотоники [1]. Технология оптических волноводов на подложках ниобата лития широко используется в различных отраслях оптических информационных технологий, что связано с уникальными свойствами кристалла ниобата лития, позволяющего реализовать практически все функциональные операции по преобразованию оптических сигналов. Потенциально данная технология может занять особое место в квантовых оптических системах и стать базой для создания квантовых-фотонных интегральных схем [2].

Высокочастотные интегрально-оптические модуляторы уже сейчас широко применяются в системах квантовых телекоммуникаций. Работа модуляторов с единичными фотонами предъявляет особые требования к собственным шумам и потерям, что обуславливает выбор модуляторов на основе оптических волноводов на подложках ниобата лития [3], шумы в которых существенно ниже по сравнению с модуляторами на основе полупроводников $A^3B^5$ и кремния. Разработанные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе амплитудные и фазовые модуляторы имеют полосу частот модуляции не менее 25 ГГц, оптические потери менее 3,5 дБ для амплитудных модуляторов и менее 1,5 дБ для фазовых модуляторов, а вносимые шумы составляют менее −170 дБ/Гц. Спецификой применений в квантовых информационных системах являются высокие требования к контрасту модуляции амплитудных модуляторов. Нами были разработаны аддитивные оптические методы повышения контраста модуляторов на основе интерферометра Маха — Цендера, позволяющие приблизиться к значению 60 дБ.

Специальный модулятор Маха—Цендера с двойным выходом был применен в качестве управляемого светоделителя для построения широкополосного источника квантового шума на основе детектирования дробового шума балансного фотоприемника. Экспериментально получено превышение квантовых шумов над классическими более чем на 12 дБ в полосе частот более 3 ГГц, что является лучшей характеристикой для данного типа источников, известной из литературы.

Дальнейшее развитие интегральной оптики на основе ниобата лития связано с появлением новых технологий формирования гибридных оптических волноводов с высокой разностью показателей преломления, таких как технология тонкопленочного ниобата лития на изоляторе [4]. Высокий контраст показателей преломления между волноводом и подложкой позволит создавать оптические схемы с размерами, характерными для полупроводниковой электроники, и открывает возможности гибридных оптоэлектронных схем на кремниевых подложках. По данному направлению в ФТИ им. А.Ф. Иоффе идет разработка интегрально-оптического сверхпроводящего детектора одиночных фотонов, являющегося наиболее проблемным для реализации на подложках ниобата лития элементом квантовых фотонных интегральных схем. Предложена конфигурация гибридной волноводной структуры, обеспечивающей эффективное преобразование моды градиентного титан-диффузного оптического волновода, согласованного с одномодовым оптическим волокном, в моду гибридного гребенчатого волновода с малым размером модового пятна. Были рассмотрены два наиболее перспективных материала для формирования гибридных волноводов: кремний и диоксид титана. Анализ показал, что эффективность преобразования свыше 95% достижима для структур на основе диоксида титана с технологическими допусками, соответствующими контактной фотолитографии. Использование разработанной гибридной структуры должно на четыре порядка повысить эффективность поглощения света детектором.

***Разработка новых технологий оптических волноводов на подложках ниобата лития финансируется из средств гранта Российского научного фонда, проект № 19-19-00511***

***Литература***

1. Moody G. et al. arXiv:2102.03323 (2021).
2. Alibart O. et al. // J. Opt., 18, 104001 (2016).
3. Петров В.М. и др. // УФН, 191, 760–780 (2021).
4. Yuechen Jia, Lei Wang and Feng Chen // Appl. Phys. Rev., 8, 011307 (2021).

УДК 535.8 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.737.739

# Компенсация теплового расширения и тепловых шумов опорных оптических резонаторов

## Compensation for Thermal Expansion and Thermal Noise in Optical Reference Cavities

**Жаднов Н. О.[1,2], Крючков Д. С.[1,2], Кудеяров К. С.[1,2], Вишнякова Г. А.[1,2], Масалов А. В.[1,2], Хабарова К. Ю.[1,2], Колачевский Н. Н.[1,2]**
*[1] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
*119991, г. Москва, Ленинский просп., 53*
*nik.zhadnov@yandex.ru*
*[2] Российский квантовый центр*
*143025, г. Москва, инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1*

**Zhadnov N. O.[1,2], Kryuchkov D. S.[1,2], Kudeyarov K. S.[1,2], Vishnyakova G. A.[1,2], Masalov A. V.[1,2], Khabarova K. Yu.[1,2], Kolachevsky N. N.[1,2]**
*[1] Lebedev Physical Institute of the RAS*
*53 Leninskiy Ave., Moscow, 119991*
*nik.zhadnov@yandex.ru*
*[2] Russian Quantum Center*
*bld. 1, 30 Bolshoy Boulevard, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 143025*

Стабильность частоты лазеров, стабилизированных по внешним опорным оптическим резонаторам, может быть нарушена тепловыми шумами и колебаниями температуры резонатора. В работе рассмотрен метод, позволяющий осуществить частичное измерение и компенсацию теплового шума зеркал, и описана оригинальная конструкция оптического резонатора, имеющего нулевой коэффициент теплового расширения. Приведены последние результаты измерений стабильности частоты ультрастабильных лазеров для стронциевых оптических часов.
**Ключевые слова:** ультрастабильные лазеры; тепловой шум зеркал резонатора; системы с нулевым тепловым расширением.

The frequency stability of lasers stabilized by external reference optical cavities can be disturbed by thermal noise and temperature fluctuations. The paper considers a method that allows partial measurement and compensation for the mirrors thermal noise, as well as describes the original design of an optical cavity with a zero thermal expansion coefficient. The latest results of measurements of the frequency stability of ultrastable lasers for strontium optical clocks have been presented.
**Keywords:** ultrastable lasers; optical cavity thermal noise; systems with zero thermal expansion.

Лазерные системы с высокой стабильностью частоты и узкой спектральной линией находят множество применений в области оптических стандартов частоты и многих фундаментальных задачах. Наибольшей стабильности частоты лазерного излучения удается достичь при помощи стабилизации по моде внешнего опорного резонатора Фабри — Перо. Стабильность частоты ультрастабильных лазерных

систем может быть ограничена множеством факторов: вибрациями, колебаниями температуры и тепловыми шумами опорного резонатора, а также шумовыми процессами в оптоэлектронной петле обратной связи. В данной работе рассмотрен метод частичной компенсации тепловых шумов в основной моде резонатора и метод создания опорных резонаторов с нулевым тепловым расширением в широком диапазоне температур.

Тепловой шум опорного оптического резонатора накладывает фундаментальное ограничение на предельную достижимую стабильность частоты лазерной системы. Указанный вид шума чаще всего оказывается вызван броуновскими колебаниями поверхностей зеркал резонатора. В работе предложен метод регистрации тепловых шумов $TEM_{00}$ моды резонатора Фабри — Перо при помощи двух «пробных» мод старших порядков, позволяющий частично компенсировать шумы в основной моде [1]. Произведено математическое моделирование, подтверждающее эффективность метода в случае, когда роль пробных выполняют моды Лагерра — Гаусса $LG_{10}$ и $LG_{03}$.

Температурная стабильность резонатора является одним из основных факторов, определяющих долговременную стабильность частоты лазерной системы. Мы предлагаем новый способ компенсации тепловых деформаций, который позволяет создавать монолитные оптические резонаторы с нулевым коэффициентом теплового расширения (КТР). Данный эффект достигается за счет сочетания теплового расширения и температурно-зависимой деформации в теле резонатора, обжатом в радиальном направлении металлическим кольцом. Приведены аналитические расчеты КТР и конечно-элементное моделирование резонатора из плавленого кварца с латунным компенсационным кольцом.

В работе также представлены последние результаты экспериментальных исследований стабильности частоты лазерных систем с опорными резонаторами из ULE-стекла длинами 48 см [2], предназначенных для работы в качестве часовых лазеров в стронциевых оптических часах.

***Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (грант № 19-72-10166).***

***Литература***

1. Жаднов Н. О., Колачевский Н. Н. Частичная компенсация тепловых шумов в основной моде оптического резонатора // Краткие сообщения по физике ФИАН, 8, 27 (2021).
2. Zhadnov N. O., Kudeyarov K. S., Kryuchkov D. S., Vishnyakova G. A., Khabarova K. Yu., Kolachevsky N. N. Long 48-cm ULE cavities in vertical and horizontal orientations for Sr optical clock. arXiv:2106.01887 [physics.ins-det].

Laser systems with high frequency stability and narrow spectral linewidth have found a lot of applications in the field of optical frequency standards and many fundamental experiments. The highest stability of the frequency of laser radiation can be achieved with the help of stabilization to a mode of an external reference Fabry — Perot cavity. Frequency stability of ultrastable laser systems can be limited by many factors: vibrations, temperature fluctuations and thermal noise of the reference resonator, as well as noise processes in the optoelectronic feedback loop. In this report, we have considered a method of partial compensation

for thermal noise in the fundamental mode of a cavity and a method for creating reference cavities with zero thermal expansion in a wide temperature range.

Thermal noise of the reference optical cavity sets a fundamental limit on the maximum achievable frequency stability of the laser system. This type of noise is most often caused by Brownian fluctuations of the surfaces of the cavity mirrors. The paper proposes a method for recording thermal noise of $TEM_{00}$ Fabry — Perot cavity mode using two "test" higher-order modes, which makes it possible to partially compensate for the noise in the fundamental mode [1]. Mathematical modeling has been carried out, which confirms the effectiveness of the method if the role of test modes is played by the Laguerre — Gauss modes $LG_{10}$ and $LG_{03}$.

The temperature stability of the cavity is one of the main factors determining the long-term stability of the frequency of the laser system. We have proposed a new method of compensation for thermal deformations, which makes it possible to create monolithic optical cavitie with a zero coefficient of thermal expansion (CTE). This effect is achieved due to a combination of thermal expansion and temperature-dependent deformation in the cavity body, compressed in the radial direction with a metal ring. Analytical calculations of the CTE and finite element modeling of a fused silica cavity with a brass compensation ring have been presented.

The paper also presents the latest results of experimental studies of the frequency stability of laser systems with reference cavities made of ULE glass with a length of 48 cm [2], developed for operation as clock lasers in strontium optical clocks.

***This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (grant № 19-72-10166).***

***References***

1. Zhadnov N. O., Kolachevsky N. N. Partial compensation of thermal noise in the fundamental mode of an optical cavity // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 8, 27 (2021).
2. Zhadnov N. O., Kudeyarov K. S., Kryuchkov D. S., Vishnyakova G. A., Khabarova K. Yu., Kolachevsky N. N. Long 48-cm ULE cavities in vertical and horizontal orientations for Sr optical clock. arXiv:2106.01887 [physics.ins-det].

УДК 539.184.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.740.743

# Влияние оптической решетки на частоту часового перехода в атомах тулия и методы управления населенностью колебательных состояний

## The Effect of Optical Lattice on the Frequency of the Clock Transition in Thulium Atoms and Methods for Controlling the Population of Vibrational States

**Мишин Д. А.[1,2], Проворченко Д. И.[1,2], Головизин А. А.[1], Федорова Е. С.[1,2], Трегубов Д. О.[1], Хабарова К. Ю.[1,2], Сорокин В. Н.[1], Колачевский Н. Н.[1,2]**
*[1] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
*119991, г. Москва, Ленинский просп., 53*
*mishin.da@phystech.edu*
*[2] Российский квантовый центр*
*143025, г. Москва, инновационный центр «Сколково»*
*Большой бульвар, 30, стр. 1*

**Mishin D. A.[1,2], Provorchenko D. I.[1,2], Golovizin A. A.[1], Fedorova E. S.[1,2], Tregubov D. O.[1], Khabarova K. Yu.[1,2], Sorokin V. N.[1], Kolachevsky N. N.[1,2]**
*[1] Lebedev Physical Institute of the RAS*
*53 Leninskiy Ave., Moscow, 119991*
*mishin.da@phystech.edu*
*[2] Russian Quantum Center*
*bld. 1, 30 Bolshoy Boulevard, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 143025*

В работе приведен анализ сдвигов частоты часового перехода в атомах тулия, вызванных взаимодействием с оптической решеткой. Показано, что эти сдвиги зависят от колебательного состояния атома, а также описаны реализованные и предлагаемые методы контроля населенности колебательных уровней.
**Ключевые слова:** магическая длина волны; оптическая решетка; спектроскопия; оптические часы; часовой переход; ультрахолодные атомы; тулий.

This paper analyzes the frequency shifts of the clock transition in thulium atoms caused by the interaction with the optical lattice. It has been shown that these shifts depend on the vibrational state of the atom, and some implemented and proposed methods for controlling the population of vibrational levels have been described.
**Keywords:** magic wavelength; optical lattice; spectroscopy; optical clock; clock transition; ultracold atoms; thulium.

На сегодняшний день разработано несколько методов захвата и удержания квантовых частиц. Для ионов используются различные конфигурации радиочастотных ловушек, а нейтральные атомы можно удерживать в магнитных, магнитооптических, дипольных ловушках и оптических решетках. При этом технология оптических решеток используется как при создании квантовых симуляторов и компьютеров, так как допускает скалирование количества кубит в широких пределах, так и при исследовании реперов и стандартов частоты, так как позволяет проводить прецизионную спектроскопию в режиме Лэмба—Дике. Однако взаимодействие атомов с решеткой неизбежно приводит к сдвигам уровней, что в ряде

задач негативно сказывается на результатах экспериментов и требует дополнительных усилий, связанных с контролем параметров решетки. Некоторые из эффектов, обусловленных этим взаимодействием, были исследованы в лаборатории оптики сложных квантовых систем ФИАН на примере оптических часов на основе ультрахолодных атомов тулия.

Анализ взаимодействия атомов с излучением оптической решетки в дипольном приближении предсказывает сдвиг частоты часового перехода, пропорциональный интенсивности излучения, формирующего решетку. Можно также показать, что в этом приближении существуют так называемые магические длины волн, для которых поляризуемости основного и возбужденного уровней часового перехода одинаковы, а сдвиг частоты оказывается равным нулю вне зависимости от интенсивности решетки. Одна из таких длин волн для часового перехода в атомах тулия была предсказана вблизи длины волны 1064 нм, на которой сформирована решетка для проведения экспериментов [1].

Однако расчеты показали, что для получения показателей относительной неточности и нестабильности на уровне $10^{-17}$–$10^{-18}$ необходим анализ следующих порядков взаимодействия атома с электромагнитным полем решетки. Грубые теоретические оценки магнито-дипольной, электроквадрупольной поляризуемости и гиперполяризуемости атомов тулия позволили определить сдвиги, связанные с этими эффектами, которые находятся на уровне единиц 17–18 знаков после запятой, но сильно зависят от колебательного состояния атома. Таким образом, для дальнейших экспериментальных исследований существенным является контроль населенности этих колебательных состояний.

Оценка населенности колебательных состояний и температуры атомов проводилась с помощью спектроскопии боковых частот часового перехода. В качестве первого решения поставленной задачи была предложена техника «просеивания» атомов, т.е. временного понижения мощности решетки так, чтобы атомы с верхних колебательных подуровней покинули область спектроскопии. Данное решение позволило в три раза понизить температуру атомов и, соответственно, уменьшить количество заселенных колебательных уровней. Более глубокое «просеивание» приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум из-за потерь в числе атомов. Этот метод был применен при вычислении поляризуемостей и оценке положения магической длины волны, что позволило повысить точность расчетов, однако охладиться до основного колебательного состояния с его помощью затруднительно — слишком большие потери в количестве атомов. Для дальнейшего экспериментального исследования поправок старших порядков планируется использовать охлаждение на боковых частотах с использованием перехода на длине волны 506 нм с естественной шириной линии 7,8 кГц при характерной частоте, соответствующей продольным колебаниям атомов в решетке, порядка 60 кГц. В настоящее время в лаборатории исследуются свойства этого перехода.

В ходе данной работы был проведен анализ сдвигов, вызванных взаимодействием атомов тулия с оптической решеткой с учетом поправок старших порядков, продемонстрирована зависимость этих сдвигов от колебательных состояний атомов и предложены возможные методы контроля этих состояний для улучшения точности расчетов рассматриваемых сдвигов.

***Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 21-72-10108.***

***Литература***

1. Golovisin A. A., Fedorova E. S., Tregubov D. O., Sukachev D. D., Khabarova K. Yu., Sorokin V. N., Kolachevsky N. N. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift // Nature communications10(1): 1724 (2019).

Several methods have been developed for the capture and confinement of quantum particles in recent years. Various configurations of RF traps are used for ions, and neutral atoms can be trapped in magnetic, magneto-optical, dipole traps and optical lattices. The optical lattice technique is used both in the creation of quantum simulators and computers, since it allows the scaling of the number of qubits in a wide range, and in the frequency standards investigation, since it allows Doppler-free spectroscopy in the Lamb — Dicke regime. However, the interaction of atoms with the lattice inevitably leads to energy shifts, which in certain situations negatively affects experimental results and requires additional efforts associated with controlling the lattice parameters. Some effects caused by this interaction were investigated in Lebedev Physical Institute in a laboratory aimed at building an optical clock based on ultracold thulium atoms.

Analysis of the atom-field interaction in the dipole approximation predicts a shift in the clock transition frequency, proportional to the intensity of the radiation that forms the lattice. It can also be shown that in this approximation there are so-called "magic" wavelengths for which the polarizabilities of the ground and excited levels of the clock transition are equal, and the frequency shift of the clock transition turns out to be zero regardless of the lattice intensity. One of these magic wavelengths for the clock transition in thulium atoms was predicted to be near 1064 nm, at which a lattice was formed for further experiments [1].

However, calculations have shown that in order to obtain relative inaccuracy and instability at the level of $10^{-17}$–$10^{-18}$, it is necessary to analyze higher orders of interaction of the atom with the electromagnetic field of the lattice. Rough theoretical estimates of the magnetic-dipole, electro-quadrupole polarizabilities and hyperpolarizability of thulium atoms made it possible to estimate the shifts associated with these effects, which, although they are at the level of 17–18 decimal places, strongly depend on the vibrational state of the atom. Thus, for further experimental studies, it is essential to control the population of these vibrational states.

The population of vibrational states and the temperature of atoms were estimated using sideband spectroscopy of a clock transition. As the first solution to the considered problem, the technique of "sifting" atoms was proposed, i. e. temporarily lowering the lattice power so that atoms from the upper vibrational sublevels leave the spectroscopy area. This solution made it possible to lower the temperature of atoms by a factor of 3 and, accordingly, to reduce the number of populated vibrational levels. Deeper "sifting" leads to a deterioration in the signal-to-noise ratio due to losses in the number of atoms. This method was applied for polarizabilities calculating and estimating the value of the magic wavelength, which made it possible to increase the accuracy of calculations. However, it is difficult to cool down to the ground vibrational state with this technique — too large losses in the number of atoms. For further experimental study of higher-order polarizabilities, it is planned to use sideband cooling on a transition at a wavelength of 506 nm with a natural linewidth of 7.8 kHz while the characteristic longitudinal vibrational frequency of atoms in the lattice is about 60 kHz. The properties of this transition are currently being investigated in the laboratory.

In this work, we have analyzed the shifts caused by the interaction of thulium atoms with the optical lattice, taking into account the higher-order corrections. The dependence of these shifts on the vibrational states of the atoms has been demonstrated, and possible methods for controlling the population of these states have been proposed. This makes it possible to make accurate experimental study of the processes under consideration and improve the thulium atomic clock relative instability down to $10^{-18}$.

***The research is supported by RSF grant № 21-72-10108.***

***References***

1. Golovisin A. A., Fedorova E. S., Tregubov D. O., Sukachev D. D., Khabarova K. Yu., Sorokin V. N., Kolachevsky N. N. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift // Nature communications10(1):1724 (2019).

УДК 530.145 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.744.746

# Анализ немарковской квантовой динамики методами машинного обучения

## Probing Non-Markovian Quantum Dynamics with Data-driven Analysis: Beyond "Black-box" Machine Learning Models

**Лучников И. А.[1,2,3], к. ф.-м. н., Киктенко Е. О.[1,3,4], к. ф.-м. н., Гавреев М. А.[1,3], Уэрдан Х.[2], к. ф.-м. н., Филиппов С. Н.[3,4,5], к. ф.-м. н., Федоров А. К.[1,3], к. ф.-м. н.**

*[1] Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий (Российский квантовый центр)*
*143025, Московская обл., Сколково, ул. Новая, 100*
*[2] Сколковский институт науки и технологий*
*121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1*
*[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[4] Математический институт им. В. А. Стеклова РАН*
*119991, г. Москва, ул. Губкина, 8*
*[5] Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*

**Luchnikov I. A.[1,2,3], Ph.D, Kiktenko E. O.[1,3,4], Ph.D, Gavreev M. A.[1,3], Ouerdane H.[2], Ph.D, Filippov S. N.[3,4,5], Ph.D, Fedorov A. K.[1,3], Ph.D**

*[1] Russian Quantum Center, Skolkovo*
*Moscow 143025, Russia*
*[2] Center for Energy Science and Technology, Skolkovo Institute of Science and Technology*
*Moscow 121205, Russia*
*[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*[4] V. A. Steklov Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences*
*8 Gubkina St., Moscow, 119991*
*[5] Valiev Institute of Physics and Technology RAS*
*36/1 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218, Russia*

Разработан алгоритм для идентификации модели немарковской квантовой динамики по наблюдаемым данным. Отличительными особенностями нового алгоритма являются:

- сходимость к оптимальному решению с математическими гарантиями;
- автоматический подбор модели;
- масштабируемость;
- интерпретируемость.

**Ключевые слова:** открытые квантовые системы; машинное обучение; немарковская динамика.

A new technique for model identification of non-Markovian quantum dynamics from observed data has been developed. The new technique has the following distinguishing features:

- convergence with mathematical guaranties to the optimal solution;
- automatic model selection;
- scalability;
- interpretability.

**Keywords:** open quantum systems; machine learning; non-Markovian dynamics.

При разработке крупномасштабных квантовых устройств необходим учет взаимодействия квантовых систем с окружением. Однако существующие подходы к учету эффектов взаимодействия квантовой системы с окружением (диссипация, эффекты памяти) либо являются модельными и плохо описывают физику реальных систем, либо приводят к возникновению неразрешимых численно задач. На практике при реализации квантового эксперимента можно воспользоваться доступом к экспериментальным данным и попытаться построить модель системы с учетом взаимодействия с окружением на основе данных. Такой подход зачастую значительно проще моделирования из первых принципов. Используя современные достижения в области машинного обучения, мы разработали алгоритм [1], позволяющий построить модель немарковской квантовой системы по наблюдаемым в физическом эксперименте данным. Наш подход позволяет оценить эффективную размерность окружения квантовой системы, определить собственные частоты системы и окружения как целого, восстановить марковское вложение, позволяющее предсказывать немарковскую динамику системы, удалить шумы из наблюдаемых данных. Мы демонстрируем работоспособность нашего подхода на различных моделях немарковской квантовой динамики, таки как кубит взаимодействующих с окружением конечной размерности; модель Джейнса — Каммингса с затуханием, спин-бозонная модель.

***Разработка метода идентификации модели немарковской квантовой динамики, анализ спин-бозонной модели и анализ модели Джейнса — Каммингса с затуханием поддержаны Российским научным фондом (19-71-10092) и лидирующим исследовательским центром «Квантовые вычисления» (соглашение № 014/20). Анализ модели немарковской квантовой динамики, индуцированной окружением конечной размерности, поддержан Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС» в рамках проекта № 19-1-2-66-1.***

***Литература***

1. Luchnikov I. A., Kiktenko E. O., Gavreev M. A., Ouerdane H., Filippov S. N. and Fedorov A. K. Probing non-Markovian quantum dynamics with data-driven analysis: Beyond “black-box” machine learning models. arXiv:2103.14490.

A precise understanding of the influence of an environment on quantum dynamics, which is at the heart of the theory of open quantum systems, is crucial for further progress in the development of controllable large-scale quantum systems. However, existing approaches to account for complex system environment interaction in the presence of memory effects are either based on heuristic and oversimplified principles or give rise

to computational difficulties. In practice, one can take advantage of available experimental data and replace the first-principles simulation with a data-driven analysis that is often much simpler. Inspired by recent advances in data analysis and machine learning, we suggest a data-driven approach [1] to the analysis of the non-Markovian dynamics of open quantum systems. Our method allows capturing the most important properties of open quantum systems, such as the effective dimension of the environment, eigenfrequencies of the joint system-environment quantum dynamics, as well as reconstructing the minimal Markovian embedding, predicting dynamics, and denoising measured quantum trajectories. We demonstrate the performance of the suggested approach on various models of open quantum systems, including a qubit coupled with a finite environment, a spin-boson model, and the damped Jaynes — Cummings model.

***The development of the data processing scheme, analysis of the spin-boson model, and analysis of the damped Jayne — Cummings model are supported by the Russian Science Foundation (19-71-10092) and by the Leading Research Center on Quantum Computing (Agreement № 014/20; analysis of non-Markovian processes for NISQ devices). The analysis of the finite-environment-induced non-Markovian quantum dynamics is supported by the Foundation for the Advancement of Theoretical Physics and Mathematics "BASIS" under Project № 19-1-2-66-1.***

***References***

1. Luchnikov I. A., Kiktenko E. O., Gavreev M. A., Ouerdane H., Filippov S. N. and Fedorov A. K. Probing non-Markovian quantum dynamics with data-driven analysis: Beyond "black-box" machine learning models. arXiv:2103.14490.

УДК 53.02 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.747.749

# Выделение немарковской компоненты квантовой динамики в псевдостохастическом представлении

## Extracting Non-Markovian Component of Quantum Dynamics within the Pseudo-stochastic Representation

**Киктенко Е. О.[1,2,3], Яшин В. И.[1,2,3], Мастюкова А. С.[1,2], Федоров А. К.[1,2]**
*[1] Российский квантовый центр*
*121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1*
*[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[3] Математический институт им. В.А. Стеклова РАН*
*119991, г. Москва, ул. Губкина, 8*

**Kiktenko E. O.[1,2,3], Yashin V. I.[1,2,3], Mastiukova A. S.[1,2], Fedorov A. K.[1,2]**
*[1] Russian Quantum Center, Russia*
*bld. 1, 30 Bolshoy Boulevard, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 143025*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*[3] V.A. Steklov Mathematical Institute of the RAS*
*8 Gubkina St., Moscow, 119991*

Рассматривается вопрос о количественном описании немарковости квантового процесса по его псевдостохастической матрице в вероятностном представлении квантовых состояний на основе информационно-полных измерений. Предлагается подход к оценке немарковской компоненты в исследуемой динамике.
**Ключевые слова:** вероятностное представление; квантовая динамика; информационно-полные измерения; марковские процессы; немарковские процессы.

The paper considers a quantitative description of a non-Markovian quantum process using its pseudo-stochastic matrix in a probability representation of quantum states based on information-complete measurements. Besides, it offers an approach to the estimation of a non-Markovian component in the quantum dynamics.
**Keywords:** probability representation; quantum dynamics; informationally complete measurements; Markovian dynamics; non-Markovian dynamics.

Функционирование реальных устройств передачи и обработки квантовой информации сопровождается неизбежным взаимодействием входящих в него носителей квантовой информации с окружением. Выделяют два класса моделей динамики открытых квантовых систем: марковские модели, в которых состояние квантовой системы в каждый следующий момент времени определяется состоянием в данный момент времени, и немарковские модели, в которых состояние квантовой системы определяется предысторией состояний системы в предыдущие моменты времени [1]. Немарковская динамика квантовых систем может быть обусловлена наличием обратного потока информации из окружения в систему.

В настоящей работе предложен подход для анализа степени немарковости квантового процесса по экспериментальным данным, а именно по псевдостохастической матрице процесса, получаемого в рамках вероятного представления квантовых состояний на основе информационно-полных измерений [2, 3]. В рамках рассматриваемого подхода степень немарковости вводится как расстояние между псевдостохастической матрицей процесса и псевдостохастической матрицей, полученной с помощью проецирования эффективного генератора исследуемого процесса на пространство марковских генераторов. Результаты применения данного подхода могут быть использованы для повышения эффективности устройств передачи и обработки квантовой информации.

***Исследование выполнено при поддержке программы лидирующего исследовательского центра (ЛИЦ) по квантовым вычислениям (соглашение № 014/20; исследование разделения марковской и немарковской динамики) и Российского научного фонда (грант № 19-71-10091, разработка общего вероятностного подхода к описанию квантовых состояний).***

***Литература***

1. Breuer H.-P, Petruccione F. The Theory of Open Quantum Systems. Oxford University Press (March 29, 2007), 636 p.
2. Kiktenko E. O., Malyshev A. O., Mastiukova A. S., Man'ko V. I., Fedorov A. K., Chruściński D. Probability representation of quantum dynamics using pseudostochastic maps // Phys. Rev. A, 2020. V. 101. P. 052320.
3. Yashin V. I., Kiktenko E. O., Mastiukova A. S., Fedorov A. K. Minimal informationally complete measurements for probability representation of quantum dynamics // New J. Phys., 2020. V. 22. P. 103026.

The functioning of real devices for the transmission and processing of quantum information is accompanied by the inevitable interaction of the quantum information carriers with the environment. There are two classes of models of open quantum systems dynamics: Markovian models, where the state of a quantum system at each next moment of time is determined by the state at a given moment in time, and non-Markovian models, where the state of a quantum system is determined by the history of the states of the system at previous moments of time [1]. The non-Markov dynamics of quantum systems can be due to the presence of a reverse flow of information from the environment to the system.

In this paper, we propose an approach for analyzing the degree of non-Markovianity of a quantum process from experimental data, namely, from the pseudo-stochastic matrix of the process obtained within the framework of the probability representation of quantum states based on information-complete measurements [2, 3]. Within the framework of the considered approach, the degree of non-Markovity is introduced as the distance between the pseudo-stochastic matrix of the process and the pseudo-stochastic matrix obtained by projecting the effective generator of the process under consideration onto the space of Markovian generators. The results of applying this approach can be used to improve the efficiency of devices for transmitting and processing quantum information.

***The work is carried out in the framework of the program of Leading research center on Quantum computing (Agreement № 014/20; study of the separation of Markovian and non-Markovian dynamics) and Russian Science Foundation (Grant № 19-71-10091; development of a general probability representation of quantum states).***

***References***

1. Breuer H.-P., Petruccione F. The Theory of Open Quantum Systems // Oxford University Press (March 29, 2007), 636 p.
2. Kiktenko E. O., Malyshev A. O., Mastiukova A. S., Man'ko V. I., Fedorov A. K., Chruściński D. Probability representation of quantum dynamics using pseudostochastic maps // Phys. Rev. A, 2020. V. 101. P. 052320.
3. Yashin V. I., Kiktenko E. O., Mastiukova A. S., Fedorov A. K. Minimal informationally complete measurements for probability representation of quantum dynamics // New J. Phys., 2020. V. 22. P. 103026.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.750.751

# Приборы и технологии ScientaOmicron для исследования электронных и электрофизических свойств новых материалов для микроэлектроники

## The Scientaomicron Instruments and Technologies for the Study of Electronic and Electrophysical Properties of New Materials for Microelectronics

**Шафоростов А. А., к. т. н., Трусов М. А., к. ф.-м. н.**
*ООО «Группа Ай-Эм-Си»*
*117638, г. Москва, ул. Криворожская, 23, корп. 3*

**Shaforostov A. A., Ph.D, Trusov M. A., Ph.D**
*IMC Group Ltd*
*23/3 Krivorozhskaya St., Moscow, 117638*

В докладе представлены новые разработки концерна ScientaOmicron для анализа поверхности в условиях сверхвысокого вакуума применительно к исследованию электронных и электрофизических свойств новых материалов для микроэлектронной промышленности.
**Ключевые слова:** ScientaOmicron; Spin-ARPES; NanoESCA; NanoProbe.

Компания ScientaOmicron — мировой лидер в области разработки технологий исследования свойств поверхности в сверхвысоком вакууме. Благодаря обладанию фундаментальными технологиями и богатейшим опытом в области сканирующей зондовой микроскопии, электронной спектроскопии, молекулярно-лучевой эпитаксии и в других смежных направлениях компания предоставляет своим клиентам лучшее оборудование для исследования поверхности из доступного на мировом рынке. В настоящем докладе мы рассмотрим новейшие методики и последние разработки ScientaOmicron для анализа поверхности в условиях сверхвысокого вакуума применительно к исследованию электронных и электрофизических свойств новых материалов для микроэлектронной промышленности.

ScientaOmicron являлась одним из родоначальников технологии фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением (Spin-ARPES). Более 40 лет данное направление успешно развивается компанией. Инструменты Spin-ARPES являются незаменимым подспорьем для исследований полупроводниковых материалов, 2D-материалов, структур для спинтроники и других новых объектов, находящихся на острие современных разработок в микроэлектронных технологиях. Электронно-оптические схемы анализаторов ScientaOmicron позволяют получать рекордное энергетическое разрешение (лучше 1 мЭв) и рекордное пространственное разрешение (лучше 40 нм) в гиперспектральных картах. Описанные технологии успешно реализованы компанией в лучших в своем классе инструментах — Spin-ARPES-Lab и NanoESCA-Lab.

Решения ScientaOmicron работают с самыми разными источниками возбуждения электронов широкого диапазона энергий: ультрафиолетовыми, рентгеновскими, лазерными DUV- и EUV-диапазонов, включая возможность время-разрешенных спектральных измерений на импульсных лазерах. Также ScientaOmicron является ведущим

поставщиком оборудования для изучения электронных свойств материалов при оснащении современных синхротронных станций.

Для изучения электрофизических свойств новых материалов в наномасштабе компания ScientaOmicron предлагает уникальный прибор LT NanoProbe, сочетающий в себе колонну электронного микроскопа для работы в сверхвысоком вакууме, электронный дифрактометр, Оже-спектрометр и четыре независимых пьезосканера для управления зондами и анализа образца в режимах атомно-силовой и туннельной микроскопии и спектроскопии. Данный прибор позволяет на атомном уровне изучать электротранспортные свойства материалов и создавать контролируемые структуры методами электронно-лучевой и зондовой литографии.

УДК 53.02 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.752.754

# Исследование марковской и немарковской квантовой динамики в псевдостохастическом представлении

## Analysing Markovian and Non-Markovian Quantum Dynamics in Pseudostochastic Representation

**Мастюкова А. С.[1,2], Яшин В. И.[1,2,3], Киктенко Е. О.[1,2,3], Федоров А. К.[1,2]**
*[1] Российский квантовый центр*
*143025, г. Москва, инновационный центр «Сколково»*
*Большой бульвар, 30, стр. 1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[3] Математический институт им. В. А. Стеклова РАН*
*119991, г. Москва, ул. Губкина, 8*

**Mastiukova A. S.[1,2], Yashin V. I.[1,2,3], Kiktenko E. O.[1,2,3], Fedorov A. K.[1,2]**
*[1] Russian Quantum Center, Russia*
*bld. 1, 30 Bolshoy Boulevard, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 143025*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*[3] V. A. Steklov Mathematical Institute of the RAS*
*8 Gubkina St., Moscow, 119991*

Предлагается подход к описанию динамики конечномерных квантовых систем с помощью псевдостохастических отображений, которые действуют на истинные распределения вероятностей. Предлагаемый метод удобен для анализа многокубитных систем и может быть использован для анализа унитарной и диссипативной эволюции квантовых систем, взаимодействующих как с марковским, так и немарковским окружением.
**Ключевые слова:** вероятностное представление; квантовая динамика; информационно-полные измерения; марковские процессы; немарковские процессы.

An approach has been proposed for describing the dynamics of finite-dimensional quantum systems using pseudo-stochastic mappings that act on full probability distributions. The proposed method is convenient for the analysis of multi-qubit systems and it can be used to analyze the unitary evolution and dissipative evolution of quantum systems interacting with both Markovian and non-Markovian environments.
**Keywords:** probability representation; quantum dynamics; informationally complete measurements; Markovian dynamics; non-Markovian dynamics.

Важный вопрос квантовой физики — удобное описание квантовых систем и их эволюции. Квантовые системы можно описать с помощью распределения вероятностей, которое получается с помощью информационно-полных квантовых измерений [1]. Такое представление было построено для симметричного случая информационно-полных квантовых измерений [2]. Данные измерения играют важную роль в различных приложениях, включая квантовую томографию [3], квантовую криптографию и квантовые вычисления на основе измерений [4]. Важность

описания динамики квантовых систем с использованием распределений вероятностей заключается в том, что становится возможно охарактеризовать неклассические свойства системы, что затруднительно при стандартном описании квантовых состояний с помощью матриц плотности. Первой попыткой использовать вероятностные распределения в квантовой механике была функция Вигнера. Но ее нельзя полностью интерпретировать как распределение вероятностей, поскольку она принимает и отрицательные значения. Последние достижения в описании квантовых систем с помощью симметричных измерений могут быть эффективно использованы для представления динамики конечномерных квантовых систем. Отличие от квазивероятностного представления состоит в том, что квантовые системы описываются с использованием истинного распределения вероятностей, полученного с помощью симметричных информационно-полных измерений.

В данной работе мы представляем подход к описанию динамики открытых квантовых систем, который включает в себя квантовую марковскую и немарковскую динамику, с точки зрения вероятностного представления с использованием псевдостохастических отображений. Мы строим псевдостохастические отображения, которые действуют на распределения вероятностей, полученные с помощью таких симметричных информационно-полных измерений. Мы продемонстрировали, что вероятностное представление квантовой динамики на основе данных измерений может быть использовано для анализа унитарной и диссипативной эволюции квантовых систем. Нами был разработан инструмент для выделения компонентов марковской и немарковской динамики квантовых процессов в рамках описания процессов с помощью псевдостохастических матриц, напрямую связанных с вероятностными распределениями, доступными для наблюдения в эксперименте. Кроме того, вероятностное представление квантовой механики позволяет количественно охарактеризовать «неклассичность» квантовых вычислений.

***Работа выполнена в рамках реализации программы лидирующего исследовательского центра «Квантовые вычисления» (соглашение № 014/20).***

***Литература***

1. Filippov S. N., Man'ko V. I. Symmetric informationally complete positive operator valued measure and probability representation of quantum mechanics // J. Russ. Laser Res., 2010. V. 31. P. 211–231.
2. Kiktenko E. O., Malyshev A. O., Mastiukova A. S., Man'ko V. I., Fedorov A. K., Chruściński D. Probability representation of quantum dynamics using pseudostochastic maps // Phys. Rev. A, 2020. V. 101. P. 052320.
3. Caves C. M., Fuchs C. A. and Schack R. Unknown quantum states: the quantum de Finetti representation // J. Math. Phys., 2002. V. 43. P. 4537.
4. Jozsa R. An introduction to measurement based quantum computation // arXiv:quant-ph/0508124, 2005.

An important question in quantum physics is the convenient description of quantum systems and their evolution. Quantum systems can be described via fair probability distribution, which is obtained via informationally complete quantum measurements (POVMs) [1]. Such a representation was constructed for symmetric POVMs (SIC-POVMs) [2]. SIC-POVMs play an important role in various applications including quantum tomography [3],

quantum cryptography, and measurement-based quantum computing [4]. It is important to describe the dynamics of quantum systems using probability distributions because it becomes possible to characterize the nonclassical properties of the system, which is difficult in the standard description of quantum states using density matrices. The first attempt to use probability distributions in quantum mechanics was the Wigner function. But the Wigner function cannot be interpreted as a probability distribution since it takes negative values. Recent advances in the SIC-POVM description of quantum systems can be effectively used to represent the dynamics of finite-dimensional quantum systems. The difference with the representation of quasi probability lies in the fact that quantum systems are described using the true probability of distribution obtained using SIC-POVM.

In this work, we present an approach to describing the dynamics of open quantum systems, which includes quantum Markovian and non-Markovian dynamics, from the point of view of a probabilistic representation using pseudo-stochastic mappings. We construct pseudo-stochastic mappings that act on the probability distributions obtained using SIC-POVMs. We have demonstrated that a probabilistic representation of quantum dynamics based on measurement data can be used to analyze the unitary and dissipative evolution of quantum systems. We have developed a tool for identifying the components of the Markovian and non-Markovian dynamics of quantum processes within the framework of describing the processes using pseudo-stochastic matrices that are directly related to the probability distributions available for observation in the experiment. In addition, the probabilistic representation of quantum mechanics allows one to quantitatively characterize the "nonclassicality" of quantum computing.

***The work is carried out in the framework of the program of Leading research center on Quantum computing (Agreement № 014/20).***

***References***

1. Filippov S. N., Man'ko V. I. Symmetric informationally complete positive operator valued measure and probability representation of quantum mechanics // J. Russ. Laser Res., 2010. V. 31. P. 211–231.
2. Kiktenko E. O., Malyshev A. O., Mastiukova A. S., Man'ko V. I., Fedorov A. K., Chruściński D. Probability representation of quantum dynamics using pseudostochastic maps // Phys. Rev. A, 2020. V. 101. P. 052320.
3. Caves C. M., Fuchs C. A. and Schack R. Unknown quantum states: the quantum de Finetti representation // J. Math. Phys., 2002. V. 43. P. 4537.
4. Jozsa R. An introduction to measurement based quantum computation // arXiv:quant-ph/0508124, 2005.

УДК 535.8 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.755

# Двухпроходная оптическая схема для системы квантового распределения ключа с кодированием на поднесущих частотах модулированного излучения

## Two-pass Optical Scheme for a Quantum Key Distribution System with Coding on Subcarrier Frequencies of a Modulated Radiation

**Банник О. И., Моисеев Е. С.**
*Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева*
*420111, г. Казань, Россия*

**Bannik O. I., Moiseyev Ye. S.**
*Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI*
*420111, Kazan, Russia*

**Ключевые слова:** квантовое распределение ключа; квантовая коммуникация; двухпроходная схема; фазовое кодирование.

Метод квантового распределения ключа (КРК) как одно из самых зрелых направлений квантовых технологий все еще нуждается в снижении себестоимости и улучшении масштабируемости для максимально широкого внедрения в практику информационной безопасности. В данной работе предложена двухпроходная оптическая схема для КРК с кодированием на боковых частотах как одного из перспективных подходов передачи квантовой информации. Предложенная схема позволяет сконцентрировать наиболее объемные и сложные элементы системы КРК в составе приемного блока, тем самым упрощая блок передатчика и облегчая решение задачи создания компактных клиентских устройств, в том числе в интегрально-оптическом исполнении. Проведен детальный теоретический анализ основных факторов, влияющих на скорость и максимальную дальность квантового распределения ключа. Проведена экспериментальная апробация предложенного подхода на оптоволоконной линии длиной 25 км в лабораторных условиях в течение суток.

***Работа выполнена в рамках госзадания — соглашение № 02.03.2020 № 00075-02-2020-051/1, реестр № 78 КБК 01104730290059611.***

УДК 621.373.8 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.756.757

# Разработка оптической квантовой памяти в волноводных структурах в кристалле $Tm^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$

## Development of Optical Quantum Memory in Waveguide Structures in the $Tm^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ Crystal

**Павлов А. В.[1], Миннегалиев М. М.[1], Герасимов К. И.[1], Урманчеев Р. В.[1], Рупасов Т. А.[1], Моисеев Е. С.[1], Калинкин А. А.[2], Кулик С. П.[2], Моисеев С. А.[1]**
*[1] Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева*
*420111, г. Казань, Россия*
*[2] Центр квантовых технологий, физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*
*119991, Россия, Москва, Ленинские Горы, 1*

**Pavlov A. V.[1], Minnegaliyev M. M.[1], Gerasimov K. I.[1], Urmancheyev R. V.[1], Rupasov T. A.[1], Moiseyev Ye. S.[1], Kalinkin A. A.[2], Kulik S. P.[2], Moiseyev S. A.[1]**
*[1] Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI*
*420111, Kazan, Russia*
*[2] Quantum Technology Centre, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University*
*1 Leninskie Gory, Moscow, 119991*

**Ключевые слова:** оптическая квантовая память; фемтосекундная лазерная печать; волноводы.

Создание квантовой памяти (КП), интегрированной в волноводно-резонаторные системы, является актуальной проблемой для практического применения квантовой памяти в квантовых коммуникациях и вычислениях. Использование волноводных структур в кристаллах, активированных редкоземельными ионами, является интересным направлениям создания интегральной КП. Используя метод фемтосекундной лазерной печати, нами в кристалле $Tm^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ были изготовлены волноводные структуры третьего типа. Преимуществом таких волноводных структур является то, что в них может распространяться излучение с произвольной поляризацией света. Более того, в работе [1] было показано, что в этом кристалле возможно также создание волноводных светоделителей 2×2 и 3×3 с разными коэффициентами деления мощности, что позволяет изготовить на одном кристалле оптический чип с заданной логикой. Такие чипы важны для дальнейшего применения в схемах интегральной КП. Ранее в кристалле $Tm^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ был реализован протокол оптической КП в схеме восстановления сигнала подавленного эха с адресной записью и считыванием входных оптических сигналов [2].

В настоящей работе был реализован протокол оптической КП в одномодовой волноводной структуре, сформированной в данном кристалле. Экспериментально были определены такие параметры, как коэффициент поглощения, время когерентности, величина неоднородного уширения линии оптического перехода ионов тулия в волноводной структуре и в немодифицированном кристалле. Далее был

экспериментально реализован протокол оптической КП для слабых световых импульсов в схеме восстановления сигнала подавленного эха. Было достигнуто хранение когерентных оптических импульсов, ослабленных до уровня одного фотона, в восстановленном сигнале подавленного эха. Для определения поперечной пространственной структуры световой моды был произведен расчет фундаментальной моды в данном волноводе методом конечных элементов. Разница в показателе преломления между участками кристалла, обработанными фемтосекундным лазером и необработанными, оценивалась в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$–$3 \cdot 10^{-3}$. При данных параметрах фундаментальная мода имеет Гауссову форму с поперечными полуширинами в ~5,1 мкм. Это позволило определить влияние пространственной неоднородности интенсивности лазерного пучка на эффективность исследуемого протокола памяти и понять пределы эффективности КП, достигаемой в подобных волноводных системах.

***Работа выполнена в рамках госзадания — соглашение № 02.03.2020 № 00075-02-2020-051/1, реестр № 78 КБК 01104730290059611.***

1. Skryabin N., Kalinkin A., Dyakonov I., Kulik S. Femtosecond laser written depressed-cladding waveguide 2×2, 1×2 and 3×3 directional couplers in $Tm^{3+}$: YAG crystal // Micromachines 11, 1 (2020).
2. Minnegaliev M. M., Gerasimov K. I., Urmancheev R. V., Zheltikov A. M., Moiseev S. A. Linear Stark effect in Y3Al5O12:Tm3+ crystal and its application in the addressable quantum memory protocol // Phys. Rev. B 103, 174110 (2021).

УДК 53.02 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.758.760

# Эффективное моделирование многокубитных цепочек

## Efficient Simulation of Multiqubit Circuits

**Лучников И. А.[1,2], Березуцкий А. В.[1,4], Киктенко Е. О.[1,2,4], Федоров А. К.[1,2]**
*[1] Российский квантовый центр*
*121205, г. Москва, инновационный центр «Сколково»*
*Большой бульвар, 30, стр. 1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[3] Institut quantique & Département de physique, Université de Sherbrooke,*
*Québec J1K 2R1, Canada*
*[4] Математический институт им. В. А. Стеклова РАН*
*119991, г. Москва, ул. Губкина, 8*

**Luchnikov I. A.[1,2], Berezutskii A. V.[1,4], Kiktenko E. O.[1,2,4], Fedorov A. K.[1,2]**
*[1] Russian Quantum Center*
*bld. 1, 30 Bolshoy Boulevard, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia*
*[3] Institut quantique & Département de physique, Université de Sherbrooke*
*Québec J1K 2R1, Canada*
*[4] V. A. Steklov Mathematical Institute of the RAS*
*8 Gubkina St., Moscow, 119991*

Предлагается эффективный метод моделирования многокубитных квантовых цепочек с помощью тензорной сети MERA (Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz). Данный подход имеет ряд преимуществ по сравнению с альтернативными методами и позволяет моделировать квантовые цепочки большой размерности.
**Ключевые слова:** квантовые вычисления; квантовые эмуляторы; физика многих тел.

A method for simulating multiqubit circuits using a MERA (Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz) tensor network has been proposed. This approach has a number of advantages in comparison with existing methods and it allows simulating large-scale circuits.
**Keywords:** quantum computing; quantum emulators; many-body physics.

Понимание пределов моделирования взаимодействующих многочастичных квантовых систем с использованием классических компьютеров имеет принципиальное значение для развития области квантовых технологий. В частности, важной задачей является моделирование квантовых цепочек на классическом компьютере. Существует несколько подходов, позволяющих приближенно моделировать квантовые цепочки, основанных на тензорных сетях и нейросетевых архитектурах [1–3]. Однако использование этих подходов сопровождается возникновением ошибок, связанных с понижением размерности задачи. Систематическое сравнение

ошибок, возникающих при моделировании на классическом компьютере с ошибками, возникающими в реальных квантовых устройствах, позволяет понять существующие ограничения. В нашей работе предлагается метод моделирования квантовых цепочек на классическом компьютере, основанный на тензорно-сетевой архитектуре MERA (Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz). MERA-анзац имеет большую выразительность, нежели чем MPS- (Matrix Product State) анзац, и позволяет верно рассчитать точность воспроизведения (fidelity) в отличие от подходов, основанных на нейронных сетях. Мы проводим сравнение предлагаемого метода с существующими подходами к моделированию квантовой динамики.

***Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-71-10092, разработка общего теоретического подхода), гранта «УМНИК» (соглашение № 103ГУЦЭС8-D3/56361; анализ реализации квантовых алгоритмов), программы Лидирующего исследовательского центра (ЛИЦ) по квантовым вычислениям (Соглашение № 014/20; исследование ошибок квантовых процессоров) и Дорожной карты по развитию квантовых вычислений в РФ (разработка подхода MERA).***

***Литература***

1. Bjarni J., Bauer B. and Carleo G. Neural-network states for the classical simulation of quantum computing // arXiv preprint arXiv:1808.05232 (2018).
2. Feng P. and Zhang P. Simulating the Sycamore quantum supremacy circuits // arXiv preprint arXiv: 2103.03074 (2021).
3. Zhou Y., Stoudenmire E. M., Waintal X. What limits the simulation of quantum computers? // Physical Review X 10.4 (2020): 041038.

Understanding the limits of classical simulation of interacting many-body quantum systems is crucial to the field of quantum technologies. Specifically, an important problem is to simulate quantum circuits using classical resources. There are a number of techniques allowing approximate simulation of quantum circuits based on tensor networks and neural networks architectures [1, 2, 3]. However, all of them suffer from inaccuracies caused by dimensionality reduction. Systematic comparison of errors in classical simulation schemes with errors emerging in quantum hardware defines actual limitations of classical simulation. Both quantum hardware and classical simulation methods are being improved constantly and the question about limits of classical simulation remains unanswered. We have made our contribution to this race by introducing a new method of classical simulation of quantum circuits based on Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz. Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz has more expressive power than Matrix Product State Ansatz and allows exact quantum fidelity evaluation in contrast with neural networks. We compare the new method with existing classical simulation methods and existing quantum hardware.

***The study was supported by the Russian Science Foundation (grant № 1971-10092, development of a general theoretical approach), UMNIK grant (Agreement № 103GUTSES8-D3 / 56361; analysis of the implementation of quantum algorithms), Program of the Leading Research Center (LRC) for quantum computing (Agreement № 014/20; study of errors of quantum processors) and the Roadmap for the development of quantum computing in the Russian Federation (development of the MERA approach).***

***References***

1. Bjarni J., Bauer B. and Carleo G. Neural-network states for the classical simulation of quantum computing // arXiv preprint arXiv:1808.05232 (2018).
2. Feng P. and Zhang P. Simulating the Sycamore quantum supremacy circuits // arXiv preprint arXiv:2103.03074 (2021).
3. Zhou Y., Stoudenmire E. M., Waintal X. What limits the simulation of quantum computers? // Physical Review X 10.4 (2020): 041038.

*ШМУ-2021 частично профинансирована грантом в форме субсидии от 25.09.2020 г. № 075-15-2020-79 (номер государственного учета НИОКТР АААА-А20-120110990073-7).*

**УДК 621.375.4 + 004.89** **DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.761.762**

# Методика автоматизированного проектирования СВЧ-усилителей с распределенным усилением

## Automated Design Method for Microwave Monolithic Distributed Amplifier

**Метель А. А.**
***лаборант***
*aleksandr.metel@50ohm.tech*

**Новичкова Ю. А.**
***младший специалист по контролю качества***
*yulia.novichkova@50ohm.tech*

*ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», лаборатория «50ohm Lab»*
*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

**Metel A. A.**
***laboratory assistant***
*aleksandr.metel@50ohm.tech*

**Novichkova Y. A.**
***junior quality control specialist***
*yulia.novichkova@50ohm.tech*

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Laboratory "50ohm Lab", Tomsk*

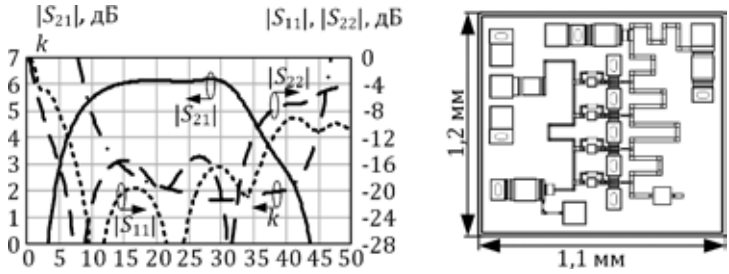
В работе приведена методика автоматизированного проектирования интегрального СВЧ-усилителя с распределенным усилением (СВЧ УРУ) по комплексу требований к линейным характеристикам. Действие методики продемонстрировано на примере разработки каскада предварительного усиления для буферного усилителя.
**Ключевые слова:** СВЧ интегральная схема; автоматизированное проектирование; генетический алгоритм; СВЧ УРУ.

The paper presents a method for automated design of microwave distributed amplifier (DA) based on requirements to linear characteristics. The proposed DA automated design technique work has been demonstrated with preamplifier stage design for buffer amplifier.
**Keywords:** microwave integrated circuit; computer-aided design; genetic algorithm; MMIC DA.

Интегральные СВЧ УРУ разрабатываются на базе различных интегральных технологий (Si, SiGe, InP, GaAs, GaN). Это позволяет разрабатывать усилители различного назначения: малошумящие усилители, буферные усилители и усилители мощности. Благодаря этому интегральные СВЧ УРУ активно применяются в системах высокоскоростной передачи данных, измерительных и оптоэлектронных системах [1–3].

Для математического описания интегрального СВЧ УРУ используется метод, в основе которого лежит представление в виде каскадного соединения восьмиполюсников в системе *A*-параметров по итерационной схеме, позволяющий использовать модели пассивных и активных интегральных компонентов [4, 5]. В методике используется подход на основе генетического алгоритма [5].

Эффективность разработанной методики автоматизированного проектирования продемонстрирована на примере разработки каскада предварительного усиления для буферного усилителя диапазона частот от 20 до 30 ГГц, выполняемого на основе 0,25-мкм GaAs pHEMT технологического процесса фаундри АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург). На рис. 1 приведены результаты моделирования основных линейных характеристик и топология полученного решения [5].




*а* *б*

**Рис. 1.** Результаты моделирования основных линейных характеристик (*а*) и топология схемного решения (*б*)

Авторы считают, что предложенная методика автоматизированного проектирования позволяет повысить эффективность разработки интегрального СВЧ УРУ.

***Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).***

***Литература***

1. Campbell C. F. Evolution of the Nonuniform Distributed Power Amplifier: A Distinguished Microwave Lecture // IEEE Microwave Magazine. 2019. Vol. 20. № 1. P. 18–27.
2. Nguyen D. P., Stameroff A. N., Pham A. A 1.5–88 GHz 19.5 dBm output power triple stacked HBT InP distributed amplifier // IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2017. P. 20–23.
3. Design and characterization of a 12–40 GHz power amplifier in SiGe technology / Li S. et al. // IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications. 2018. P. 23–25.
4. Niclas K. N. et al. On theory and performance of solid-state microwave distributed amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1983. Vol. 31. № 6. P. 447–456.
5. Метель А. А. и др. Автоматизированное проектирование линейных интегральных СВЧ-усилителей с распределенным усилением // Вопросы радиоэлектроники, 2021. — № 3. — С. 40–48.

***This work is funded by the Russian Science Foundation (grant 19-79-10036).***

УДК 53.043 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.763.764

# Исследование эффекта горячих носителей в МОП-транзисторах с различной длиной канала

## Research on Hot Carriers Effect in MOS Transistors with Different Gate Length

**Кудрявцев М. В.**
***инженер***
*mkudryavtsev@niime.ru*

**Воеводин А. В.**
***начальник лаборатории***
*avoevodin@niime.ru*

**Михайлов А. А.**
***начальник отдела***
*amihaylov@niime.ru*

*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Kudryavtsev M. V.**
***engineer***
*mkudryavtsev@niime.ru*

**Voevodin A. V.**
***head of laboratory***
*avoevodin@niime.ru*

**Mihailov A. A.**
***head of department***
*amihaylov@niime.ru*

*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

Проведены исследования n-канальных КНИ-транзисторов на влияние горячих носителей в зависимости от длины канала, выполнен анализ результатов измерений, получено время наработки на отказ (TTF), определена зависимость TTF от длины канала.
**Ключевые слова:** горячие носители; распределение Вейбулла; TTF.

The paper highlights N-channel SOI transistors with different channel lengths for degradation when exposed to hot carriers. Besides, the results are analyzed, the time to failure (TTF) is obtained, and the dependence of TTF on the channel length is determined.
**Keywords:** hot carriers; Weibull distribution; TTF.

### *Введение*

Одной из основных причин наступления параметрического отказа МОП-транзисторов является деградация приборных характеристик вследствие

воздействия электронов с высокими энергиями [1]. Данный эффект широко известен под названием «инжекция «горячих» носителей». С уменьшением размеров транзисторов влияние деградации на работоспособность приборов, вызванной горячими носителями, становится более выраженным [2], поэтому исследования в данной области являются актуальной задачей.

Целью работы является определение зависимости TTF от длины канала в КНИ-транзисторах, определение масштабных параметров в уравнении функции вида TTF = f(L), сравнение с моделью.

***Метод исследований***

Объектами исследования были транзисторы с различной L (длина канала), для получения статистически значимого результата были измерены все кристаллы на пластине. Метод исследования заключался в использовании ускоряющего фактора (напряжение питания Vdd), усиливающего деградационные процессы. Определены режимы «стрессового» воздействия (напряжения затвора Vgstress и стока Vdstress) методом наибольшего тока в подложку и выходной ВАХ до начала области пробоя соответственно. Таким образом, был обеспечен режим «наихудшего случая» [3]. Режим стресса: Vgstress = 1,8 (В); Vdstress = 3,5, 3,75, 4 (В). При исследовании проводилось чередование режима стресса и режима бесстрессового съема параметров тока Idlin и порогового напряжения Vth. Контролировались изменения параметров в зависимости от времени стресса. Измерения проводились до достижения определенного накопленного значения времени стресса.

***Результаты и их анализ***

Результаты, полученные при повышенных нагрузках, экстраполировали на нормальные условия эксплуатации с применением статистического распределения Вейбулла. Для каждого транзистора получено значение времени наработки до отказа (TTF) с определенной доверительной вероятностью. Для этого был установлен критерий отказа в виде определенного изменения электрического параметра (тока или порогового напряжения). Затем была получена зависимость TTF от длины канала. Далее для масштабирования по длине канала применялась модель TAKEDA и были получены модельные коэффициенты.

Результаты данной работы могут быть использованы при квалификационных испытаниях на горячие носители, а также при схемотехническом моделировании.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: в 3 чч. // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. — Ч. 1. — 2017. — Вып. 1 (165). — С. 59–63; Ч. 2. —2017. — Вып. 4 (168). — С. 16–41; Ч. 3. — 2018. — Вып. 3 (171). — С. 63–93.
2. Горнев Е. С., Теплов Г. С. Математическая модель конечного автомата абстрактного нейрона и сетей на его основе // Нано- и микросистемная техника, 2018. — Т. 20. — № 7. — С. 434–442.
3. Волков А. Н. Негативное влияние эффектов «горячих» носителей в полевых транзисторах // Технические науки: теория и практика: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2016 г.). — Чита: Молодой ученый, 2016. — С. 35–38.

УДК 621.3.049.78 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.765.766

# Интегральный электростатический микроэлектромеханический логический вентиль с подвижным затворным электродом

## Integral Electrostatic Microelectromechanical Logic Gate with Movable Gate Electrode

**Соловьев А. А.**
***аспирант***
*solovev_aa@mirea.ru*

**Певцов Е. Ф., к. т. н.**
***директор центра проектирования***
*pevtsov@mirea.ru*

*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

**Solovev A. A.**
***postgraduate***
*solovev_aa@mirea.ru*

**Pevtsov E. F., Ph.D**
***director of the design center***
*pevtsov@mirea.ru*

*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

В работе приведена модель микроэлектромеханического логического вентиля с подвижным затворным электродом, преобразующего электрический сигнал в механические колебания и способного выполнять функцию булевой алгебры «Исключающее ИЛИ».
**Ключевые слова:** микроэлектромеханические системы; МЭМС; вентиль; логика; CoventorMP; CADENCE.

This paper presents a model of a microelectromechanical logic valve with a movable gate electrode that converts electrical signal into mechanical vibrations, and is capable of performing the Boolean algebra function “Excluding OR”.
**Keywords:** microelectromechanical systems; MEMS; gate; logic; CoventorMP; CADENCE.

### *Введение*

Микроэлектромеханические вентили являются перспективными аналогами КМОП-транзисторов из-за сверхнизких токов утечки. Целью данной работы является создание полезной модели логического вентиля в САПР CoventorMP [1], которая может быть применена при разработке и изготовлении типовых узлов вычислительных систем и цифровых электронных схем на МЭМС-элементах, обладающих повышенной стойкостью к температурным и радиационным воздействиям.

### *Конструкторские и технические характеристики*

МЭМС-вентили являются жизнеспособными кандидатами для будущих энергоэффективных цифровых интегральных схем, а за счет масштабирования физических размеров возможно уменьшение напряжения переключения и увеличение быстродействия [2].

Микроэлектромеханический логический вентиль (рис. 1) имеет следующие основные параметры: площадь 100×100 мкм, площадь затвора 30×30 мкм, ширина подвеса, прикрепленного к основанию, 27,5 мкм.

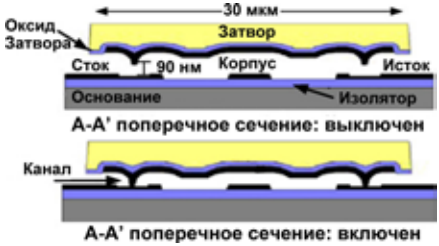



**Рис. 1.** Поперечное сечение МЭМС-вентиля

Представленный в работе логический вентиль отличается от аналогов [3] тем, что в нем уменьшен зазор между затвором и корпусным электродом при выключенном состоянии до 180 нм, зазор между контактами канала и стоком/истоком — до 90 нм, что позволяет снизить рабочее напряжение (Vpi) до 10 В и уменьшить время переключения до 100 нс.

***Принцип работы логического вентиля***

При достаточном напряжении между затвором и корпусным электродом (Vpi) электростатическая сила противодействует механической силе деформации пружины (подвесок) и затвор смещается по вертикали, притягиваясь к электродам [4]. Вольфрамовый канал (прикрепленный под затвором с оксидным слоем затвора $Al_2O_3$) защелкивается в контакте с вольфрамовыми электродами стоком и истоком и создает путь проводимости, включая логический вентиль.

***Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (грант № 225ГУЦЭС8-D3/56502) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №FSFZ-0706-2020-0022).***

***Литература***

1. Соловьев А., Курдюков С. Современные решения для моделирования и проектирования МЭМС в среде CoventorMP // Электроника НТБ, 2021. — № 3 (304). — С. 66–71.
2. Akarvadar K. et al. Design Considerations for Complementary Nanoelectromechanical Logic Gates // IEEE IEDM, Dec. 2007.
3. Chen F. et al. Integrated Circuit Design with NEM Relays // IEEE/ACM ICCAD, Nov. 2008.
4. Kam H. et al. Design and Reliability of a Micro-Relay Technology for Zero-Standby-Power Digital Logic Applications // IEEE IEDM, Dec. 2009.

***This work was financially supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology. (grant № 225ГУЦЭС8-D3/56502) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project №FSFZ-0706-2020-0022).***

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.767.768

# Уравнения модели для эффектов, зависящих от топологии (LDE) в КМОП-технологии

## Model's Equations for MOSFET Layout Dependent Effects

**Кириллова А. В.**
***инженер***
*akirillova@niime.ru*

**Потупчик А. Г.**
***нач. отдела***
*apotupchik@niime.ru*

**Шемякин А. В.**
***начальник лаборатории***
*ashemyakin@niime.ru*

*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Kirillova A. V.**
***engineer***
*akirillova@niime.ru*

**Potupchik A. G.**
***head of department***
*apotupchik@niime.ru*

**Shemyakin A. V.**
***head of laboratory***
*ashemyakin@niime.ru*

*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В данной статье представлена разработка компактного модельного решения для эффектов близости (LDE) в КМОП-технологиях с нормами проектирования 30 нм и менее.
**Ключевые слова:** моделирование; LDE; LOD; PSE; WPE; OSE; модель; уравнения модели.

This paper presents the development of a compact model solution for layout denendent effects in MOSFET technologies with design numbers of 30 nm or less.
**Keywords:** modeling; LDE; LOD; PSE; WPE; OSE; model; model equations.

В технологиях с нормами проектирования 90 нм и менее т. н. эффекты близости (LDE) оказывают значительное влияние на производительность устройств. В основном это обусловлено воздействием механического стресса кремниевой решетки и фактора агрессивного масштабирования. Из-за LDE изменение производительности прибора может достигать 10%. С точки зрения электрофизики LDE влияет на пороговое напряжение и подвижность носителей в канале транзистора.

С постоянным уменьшением масштабов технологии КМОП в соответствии с законом Мура [1] параметры устройств становятся более чувствительными к конструктивным факторам. Влияние топологического окружения на пороговое напряжение (Vth), крутизну (gm), линейные токи стока и токи насыщения (IDLin, IDsat) полевого МОП-транзистора значительно. В современных схемах учет данного дополнительного фактора изменчивости на стадии проектирования является актуальным вопросом [2].

В данной работе представлен анализ и допустимые решения для выражений, на базе которых возможно создание компактной модели основных LDE-эффектов:

1) WPE — эффект близости кармана;
2) PSE — эффект дистанции между поликремнием;
3) LOD — эффект щелевой изоляции;
4) OSE — эффект взаимовлияния активных областей.

С учетом совместимости современных симуляторов (таких как SPECTRE) имеется возможность интеграции более точных уравнений для порогового напряжения и для подвижности носителей в модель промышленного стандарта (такую как BSIM4) [3]. Эти уравнения для эффектов LDE могут быть реализованы в виде макромодели с последующей интеграцией в ядро.

В результате использования получившейся модели были определены характеристики для анализа дрейфа тока насыщения в зависимости от каждого из вышеперечисленных эффектов. Проведен сравнительный анализ влияния LDE-эффектов на общее качество полученных характеристик.

***Выводы***

Были рассмотрены физические модели, которые могут учесть влияние LDE-эффектов. Из результатов моделирования видно, что на PMOS более сильное влияние оказывают эффекты LOD и OSE, в то время как на NMOS — WPE.

***Литература***

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2 томах. — М., 2013.
2. Ruoyuan Li, Jiajia Tao, Tao Yang et al. A systematic study of layout proximity effects for 28 nm poly/SiON logic technology // 2015 China Semiconductor Technology International Conference. DOI: 10.1109/CSTIC.2015.7153318.
3. Шелепин Н.А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника, 2004. — №9. — С. 30–35.

УДК 538.97 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.769.770

# Распределения потенциалов в системах сенсор — электролит с диэлектрофоретическим управлением аналитом

## Potential Distribution in Sensor-electrolytic Systems with Dielectrophoretic Analyte Control

**Зайцева Э. Г.**
***м. н. с.*[1]**
*zayceva@isp.nsc.ru*

**Генералов В. М., д. т. н.**
***в. н. с.*[2]**
*general@vector.nsc.ru*

**Наумова О. В., д. ф.-м. н.**
***доцент*[1], *зав. лаб.*[1]**
*naumova@isp.nsc.ru*

**Сафатов А. С., д. т. н.**
***зав. отделом*[2]**
*safatov@vector.nsc.ru*

**Асеев А. Л., академик РАН, д. ф.-м. н.**
***г. н. с.*[1]**
*al.aseev2011@yandex.ru*

[1] *Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*
[2] *ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора*
*630559, р.п. Кольцово, Новосибирская обл., Россия*

**Zaytseva E. G.**
***junior researcher*[1]**
*zayceva@isp.nsc.ru*

**Generalov V. M., Ph.D**
***senior researcher*[2]**
*general@vector.nsc.ru*

**Naumova O. V., Ph.D**[1]
***head of laboratory*[1]**
*naumova@isp.nsc.ru*

**Safatov A. S., Ph.D**
***head of deparment*[2]**
*safatov@vector.nsc.ru*

**Aseev A. L., academician of RAS, Ph.D**
***general researcher*[1]**
*al.aseev2011@yandex.ru*

[1] *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*
[2] *VECTOR FSRI SRC VB*
*Kol'tsovo, Novosibirsk Region, 630559, Russia*

Работа посвящена исследованию распределения потенциалов в системах сенсор — электролит с управлением концентрацией аналита переменным электрическим полем и исследованию особенностей поведения аналита в таких устройствах.
**Ключевые слова:** биосенсор; кремний на изоляторе; диэлектрофорез.

This study is aimed at investigating the potential distribution in the sensor-electrolyte systems with control of the analyte concentration by an alternating electric field and studying the features of the analyte behavior in such devices.
**Keywords:** biosensor; silicon-on-insulator; dielectrophoresis.

***Введение***

Сенсорные устройства на основе полевых транзисторов, где высокочувствительным элементом является нанопроволока или нанополоска кремния на изоляторе, считаются универсальной платформой для обнаружения биочастиц различной природы [1, 2]. Одной из ключевых проблем таких устройств является доставка аналита к сенсорным элементам. Эффективным решением этой проблемы при детекции аналита в жидкостях является использование диэлектрофореза (ДЭФ) — электрокинетического движения диэлектрически поляризованных частиц в неоднородном переменном электрическом поле. ДЭФ-манипуляция биочастицами определяется свойствами как самих частиц (их размерами, поляризуемостью), так и сенсорных систем (диэлектрической проницаемостью электролита, конструктивными параметрами устройств), от которых зависит распределение потенциалов и в конечном счете сила, действующая на аналит.

Целью данной работы являлось исследование распределения потенциалов в системах сенсор — электролит с ДЭФ-управлением концентрацией аналита и анализ особенностей поведения аналита в таких системах.

***Результаты***

В работе приведены результаты моделирования в среде TCAD Sentarius систем сенсор с ДЭФ-управляющими электродами — электролит. Получены распределения потенциалов, градиента квадрата напряженности электрического поля и распределения концентрации моделируемого аналита в зависимости от: 1) диэлектрической проницаемости электролита, 2) частоты и амплитуды напряжения на ДЭФ-электродах, 3) формы ДЭФ-электродов и их расстояния до сенсорного элемента.

***Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-02091.***

***Литература***

1. Dmitrienko E., Naumova O., Fomin B., Kupryushkin M., Volkova A., Amirkhanov N., Semenov D., Pyshnaya I., Pyshnyi D. Surface modification of SOI-FET sensors for label-free and specific detection of short RNA analyte // Nanomedicine, 2016. V. 11. № 16. P. 2073–2082.
2. Наумова О. В., Генералов В. М., Зайцева Э. Г., Латышев А. В., Асеев А. Л., Пьянков С. А., Колосова И. В., Ананько Г. Г., Агафонов А. П., Гаврилова Е. В., Максютов Р. А., Сафатов А. С. Биосенсоры на основе КНИ-нанопроволочных транзисторов для биомедицины и вирусологии // Микроэлектроника, 2021. — Т. 50. — № 3. — С. 166–174.

***This work was supported by the RFBR grant № 18-29-02091.***

УДК 538.975 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.771.772

# Анализ доминирующих механизмов рассеяния в тонких пленках

## Analysing Dominant Scattering Mechanisms in Structures Based on Thin Films

**Зайцева Э. Г.**
***младший научный сотрудник***[1]
*zayceva@isp.nsc.ru*

**Наумова О. В., д. ф.-м. н.**
***доцент, зав. лаб.***[1]
*naumova@isp.nsc.ru*

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*

**Zaytseva E. G.**
***junior researcher***
*zayceva@isp.nsc.ru*

**Naumova O. V., Ph.D**
***head of the laboratory***
*naumova@isp.nsc.ru*

*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*

Работа посвящена определению закономерностей поведения подвижности в структурах на основе тонких пленок и исследованию доминирующих механизмов рассеяния при разных условиях на гетерограницах.
**Ключевые слова:** подвижность; механизмы рассеяния; пленки «кремний на изоляторе»; TCAD-моделирование.

The paper highlights the behavior of mobility in thin-film structures, as well as dominant scattering mechanisms under different conditions at the film interfaces.
**Keywords:** mobility; scattering mechanisms; silicon-on-insulator films; TCAD simulation.

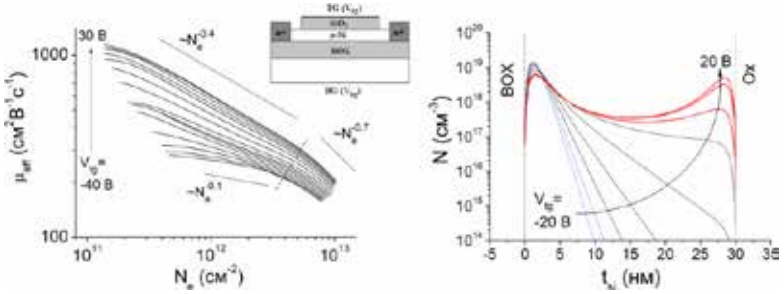
### *Введение*

Подвижность носителей заряда $\mu_{eff}$ является ключевым параметром электронного транспорта носителей, который дает физическое понимание процессов их рассеяния. Анализ $\mu_{eff}$ и доминирующих механизмов рассеяния имеет существенное значение при разработке и синтезе новых материалов, разработке новых тонкопленочных технологий, проектировании устройств и др. [1–3]. При работе с тонкими пленками мы имеем дело с таким явлением, как coupling-эффект или взаимосвязь потенциалов на противоположных ГР [4, 5]. В результате coupling-эффекта анализ механизмов рассеяния в тонкопленочных структурах становится проблематичным, поскольку условия на двух ГР пленки будут в равной степени влиять на значение подвижности.

Цель работы состояла в исследовании доминирующих механизмов рассеяния носителей в тонких пленках. Для этого использовались КНИ МОП-транзисторы с толщиной пленки $t_{si}$ = 30 нм (вставка, рис. 1*а*). Затвор BG использовался в качестве управляющего, затвор TG позволял менять режим пленки от инверсии до обогащения. Анализ доминирующих механизмов рассеяния проводился с использованием экспериментальных температурных измерений подвижности и численных расчетов в TCAD, включая расчет распределений концентрации носителей заряда $N(t_{si})$ и их подвижности $\mu(t_{si})$.

***Результаты***

На рис. 1 представлены экспериментальные $\mu_{eff}(N_e)$ зависимости ($N_e$ — плотность индуцированных носителей заряда) и расчетные $N(t_{si})$ зависимости для КНИ МОП-транзисторов при варьировании напряжения на затворе TG.




*а* *б*

**Рис. 1.** Зависимости (*а*) $\mu_{eff}(N_e)$ и (*б*) $N(t_{Si})$ для КНИ МОПТ при варьировании $V_{tg}$. На вставке — схематичное изображение КНИ МОПТ, $t_{si}$ = 30 нм

Установлено, что при аппроксимации $\mu_{eff}(N_e)$ зависимостей степенными функциями $N_e^{-n}$ изменение показателя *n* имеет закономерный характер в зависимости от $N_e$ и режима пленки со стороны TG. Значения *n* определяются распределением свободных носителей в пленках. Установлено соответствие между значениями показателя *n* и доминирующими механизмами рассеяния в тонких пленках.

***Литература***

1. Dutta P., Gao Y., Rathi M., Yao Y., Li Y., Martinez J., Selvamanickam V. High mobility single-crystalline-like silicon thin films on inexpensive flexible metal foils by plasma enhanced chemical vapor deposition // Acta Materialia, 2018. V. 147. P. 51.
2. Shojaei F., Mortazavi B., Zhuang X., Aziza M. Silicon diphosphide ($SiP_2$) and silicon diarsenide ($SiAs_2$): Novel stable 2D semiconductors with high carrier mobilities, promising for water splitting photocatalysts // Material Today Energy, 2020. V. 16. 100377.
3. Osintsev D., Sverdlov V., Selberherr S. Electron mobility and spin lifetime enhancement in strained ultra-thin silicon films// Solid-State Electronics, 2015. V. 112. P. 46.
4. Cristoloveanu S., Bawedin M., Ionica I. A review of electrical characterization techniques for ultrathin FDSOI materials and devices // Solid-State Electronics, 2016. V. 117. P. 10.
5. Zaytseva E. G., Naumova O. V., Gutakovskii A. K. Extraction of the components of effective mobility in thin films // Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. Vol. 54. P. 255105.

УДК 004.94 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.773.775

# Интервальный подход к задаче моделирования мемристивных элементов

## An Interval Approach to the Problem of Modeling Memristive Elements

**Морозов А. Ю., к. ф.-м. н.**
***н. с.[1], старший преподаватель[2]***
*morozov@infway.ru*

**Абгарян К. К., д. ф.-м. н.**
***доцент, зав. отделом[1], зав. кафедрой[2]***
*kristal83@mail.ru*

**Ревизников Д. Л., д. ф.-м. н., профессор**
***в. н. с.[1], профессор[2]***
*reviznikov@mai.ru*

*[1] Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)*
*119333, г. Москва, Вавилова, 44, кор. 2*
*[2] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*
*125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4*

**Morozov A. Y., Ph.D**
***research[1], senior lecturer[2]***
*morozov@infway.ru*

**Abgaryan K. K., Sc.D**
***Docent, head of department[1,2]***
*kristal83@mail.ru*

**Reviznikov D. L., Sc.D, Professor**
***leading researcher[1], professor[2]***
*reviznikov@mai.ru*

*[1] "Computer Science and Control" Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (FRC IU RAS).*
*bld. 2, 44 Vavilova, Moscow, 119333*
*[2] Moscow Aviation Institute (National Research University)*
*4 Volokolamskoe Hwy., Moscow, 125993, Russia*

В работе представлена модификация известной модели мемристора путем замены некоторых параметров интервальными неопределенностями. В результате моделирования получена интервальная вольт-амперная характеристика (ВАХ), которая включает в себя экспериментальную кривую по оксиду гафния.
**Ключевые слова:** алгоритм адаптивной интерполяции; интервальная модель мемристора; интервальная ВАХ; $HfO_2$.

The paper highlights a modification of the well-known memristor model by replacing some parameters with interval uncertainties. As a result of modeling, an interval current-voltage characteristic has been obtained, which contains an experimental curve for hafnium oxide.

**Keywords:** adaptive interpolation algorithm; interval memristor model; interval I — V characteristic; $HfO_2$.

***Введение***

Зачастую существующие математические модели мемристоров не в полной мере воспроизводят экспериментальные данные. В работе предлагается подход, заключающийся во введении интервальных параметров, благодаря чему увеличивается гибкость модели.

***Математическая модель мемристора***

Рассматривается модель мемристора [1, 2] основанная на модели Lehtonen-Laiho с оконной функцией Biolek:

$$\frac{dx}{dt} = a \cdot V^s \begin{cases} 1-(1-x)^p, V \le -v_{thr}, \\ 0, -v_{thr} < V \le v_{thr}, \\ 1-x^p, V > v_{thr}, \end{cases}$$

$$I = x^n \beta \sinh(\alpha_M V) + \chi\left[\exp(\gamma V) - 1\right], \; p = 2\,\mathrm{round}\left[b\left(|V| + c\right)^{-1}\right],$$

где $x \in [0, 1]$ — переменная состояния; $a$ — постоянная, определяемая свойствами материала; $s$ — нечетное целое число; $I$, $V$ — текущие значения тока и напряжения; $v_{thr}$ — пороговое значение напряжения активации; $n$, $\beta$, $\alpha_M$, $\chi$, $\gamma$ — подгоночные параметры в выражении для тока; round — функция получения целочисленного результата; $b$, $c$ — подгоночные коэффициенты основного уравнения.

***Результаты***

Моделирование выполнялось при следующих значениях параметров: $x(0) = 0$, $v_{thr} = 0{,}4$ В, $\alpha_M \in [1{,}7, 2{,}1]$ $В^{-1}$, $\beta = 9 \cdot 10^{-5}$ В, $\gamma \in [0{,}05, 0{,}4]$ $В^{-1}$, $\chi = 15 \cdot 10^{-5}$ В, $a \in [1, 1, 1]$ $В^{-5}$, $b = 15$ В, $c = 2$ В, $n = 9$, $s = 5$, $V(t)$ — рис. 1*б*. Выбор таких значений обусловлен получением интервальной ВАХ, содержащей экспериментальную кривую по оксиду гафния [1]. Для решения полученной интервальной системы применялся алгоритм адаптивной интерполяции [3]. На рис. 1*а* серым цветом показана полученная интервальная ВАХ и черным цветом — экспериментальная.

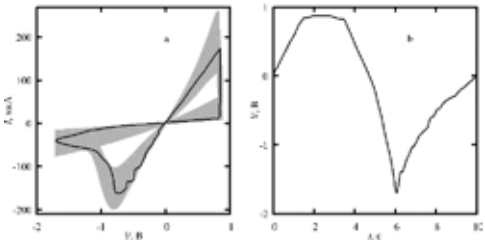


**Рис. 1.** Интервальная и экспериментальная ВАХ (*а*); зависимость напряжения от времени (*б*)

Здесь наблюдается, что экспериментальная ВАХ полностью содержится в полученной интервальной ВАХ.

При дальнейшем использовании модели можно применять как интервальный аппарат, так и стохастический.

***Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-03051 мк.***

***Литература***

1. Mladenov V. Analysis of Memory Matrices with $HfO_2$ Memristors in a PSpice Environment // Electronics, 2019. V. 8. № 4. 383. P. 16.
2. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Mathematical model of a neuromorphic network based on memristive elements // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. V. 143. 110548.
3. Морозов А. Ю., Журавлев А. А., Ревизников Д. Л. Анализ и оптимизация алгоритма адаптивной интерполяции численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными параметрами // Дифференциальные уравнения, 2020. — Т. 56. — № 7. — С. 960–974.

***This work was supported by the RFBR grant № 19-29-03051 мк.***

УДК 621.3.019.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.776.778

# Применение методики статистического прогнозирования деградации параметров схемы для оценки показателей надежности

## Applying the Method of Statistical Forecasting of Degradation of Scheme Parameters for Reliability Indexes Assessment

**Селецкий А. В., к. т. н.**
***начальник лаборатории*[1]**
*aseletskiy@niime.ru*

**Соловьев А. В., к. т. н.**
***ведущий инженер конструктор*[1], *ассистент*[2]**
*andsolovev@niime.ru*

[1] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Seletskiy A. V., Ph.D**
***head of the laboratory*[1]**
*aseletskiy@niime.ru*

**Solovev A. V., Ph.D**
***leading design engineer*[1], *assistant*[2]**
*andsolovev@niime.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

В статье рассмотрена методика расчета показателей надежности при ускоренных испытаниях изделий с использованием статистического прогнозирования деградации параметров — критериев годности (анализа возникновения постепенных отказов).
**Ключевые слова:** надежность ЭКБ; интенсивность отказов; расчетно-экспериментальный метод оценки надежности; метод трендов.

The article considers a method for calculating reliability indicators for accelerated testing of products using statistical prediction of the degradation of parameters-the validity criteria (analysis of the occurrence of gradual failures).
**Keywords:** reliability of electronic components; failure rate; design-experiment method of reliability assessment; trend method.

### *Введение*

Оценка показателей надежности электрорадиоизделий (ЭРИ) является обязательной процедурой, выполняемой на этапе проектирования аппаратуры [1, 2].

Для оценки изделий к требованиям к надежности применяют расчетные, расчетно-экспериментальные и экспериментальные методы [3–5]. В данной работе рассматриваются расчетно-экспериментальные методы оценки надежности ЭРИ.

***Методика расчета показателей надежности***

При отсутствии отказов дополнительно проводят обработку результатов испытаний методом статистического прогнозирования изменения во времени параметров — критериев годности изделий в целях оценки гамма-процентного ресурса и средней интенсивности отказов (метод трендов) [6]. Для этого по результатам испытаний определяются математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение скорости деградации параметров. Предполагается, что деградация проходит по линейному закону. При заданной доверительной вероятности ($\beta = 0{,}6$) определяют верхнюю $v_{верх}$ и нижнюю $v_{нижн}$ односторонние доверительные границы математического ожидания скорости изменения параметров с использованием распределения Стьюдента. Далее вычисляют математическое ожидание $m_\gamma$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_\gamma$ наработки по каждому из параметров — критериев годности.

Законом распределения является нормальный закон с математическим ожиданием и дисперсией, определенными для испытываемого изделия. Значение $T_\gamma$ для каждого из параметров определяют как корень уравнения:

$$F(T_\gamma) = \Phi(m_\gamma; \sigma_\gamma) = 1 - \gamma,$$

где γ — вероятность безотказной работы, выраженная в процентах.

Значения средней интенсивности отказов по каждому параметру — критерию годности вычисляются по формуле

$$\lambda_{ср} = \frac{1}{t_\lambda} \int_0^{t_\lambda} \frac{f(t)}{1 - F(t)} dt,$$

где $f(t) = dF(t)/dt$ — функция плотности распределения наработки изделия до отказа.

Из всех вычисленных значений гамма-процентной наработки до отказа и средней интенсивности отказов по каждому из параметров — критериев годности в качестве критического параметра испытываемого изделия берется наименьшее значение.

***Выводы***

По описанной выше методике проведен расчет показателей надежности при испытаниях на безотказность разработанных микросхем. С точки зрения деградации критичным параметром является выходное напряжение низкого уровня. Гамма-процентный срок наработки $T\gamma$ (при $\gamma = 99\,\%$) составляет не менее 885 000 ч.

По результатам расчета установлено, что в течение срока наработки, прописанного в ТЗ на изделие (132000 ч), при температуре окружающей среды $T_{окр.}$ не более 65 °С интенсивность отказов много меньше $10^{-8}$ отказов в час (фактически стремится к нулю).

Значение интенсивность отказов $10^{-8}$ отказов в час достигается в случае наработки порядка 884 000 ч.

Стоит отметить, что метод трендов не оценивает вероятность случайных отказов, поэтому применим для определения показателей надежности микросхемы в период стабильной работы.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — 800 с.
2. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
3. ГОСТ РВ 20.57.414-97. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям к надежности.
4. Соловьев А. В., Селецкий А. В. Недостатки отечественных расчетно-экспериментальных методик прогнозирования надежности интегральных схем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2020. — № 1. — С. 76–81.
5. Шелепин Н. А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника, 2004. — № 9. — С. 30–35.
6. Гербин А. Типовая методика ускоренных испытаний ЭКБ на надежность // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2020. — № 2. — С. 100–105.

УДК 537.868.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.779.781

# Исследование потерь СВЧ-сигнала в линиях передач на основе гетероструктуры AlGaN/GaN на кремнии

## Research on Microwave Losses in Transmission Lines in AlGaN/GaN on Silicon Structures

**Ромодин М. С.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*mromodin@niime.ru*

**Баранов Г. В., к. ф.-м. н.**
***начальник лаборатории[1], ассистент[2]***
*gbaranov@niime.ru*

**Дорофеев А. А.**
***ведущий научный сотрудник[1]***
*adorofeev@niime.ru*

**Панасенко П. В., д. т. н.**
***профессор, заместитель генерального директора[1]***
*ppanasenko@niime.ru*

**Царев А. В.**
***ведущий научный сотрудник[1]***
*atsarev@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Romodin M. S.**
***researcher[1], postgraduate[2]***
*mromodin@niime.ru*

**Baranov G. V., Ph.D**
***Head of Laboratory[1], assistant[2]***
*gbaranov@niime.ru*

**Dorofeev A. A.**
***Leading Researcher[1]***
*adorofeev@niime.ru*

**Panasenko P. V., Ph.D**
***professor, Deputy General Director[1]***
*ppanasenko@niime.ru*

**Tsarev A. V.**
***Leading Researcher[1]***
*atsarev@niime.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе предложена методика оценки потерь СВЧ-сигнала в линиях передач на структурах, предназначенных для создания GaN/Si СВЧ МИС. Экспериментальными методами проведена верификация результатов трехмерного электромагнитного моделирования потерь СВЧ-сигнала.
**Ключевые слова:** AlGaN/GaN HEMT; GaN на Si; СВЧ HEMT; СВЧ-линии передач; СВЧ МИС.

The paper presents research methodology of microwave losses in transmission lines on GaN/Si structures. The experimental study verification of microwave losses carried out by the three-dimensional computer modeling methods.
**Keywords:** AlGaN/GaN HEMT; GaN on Si; microwave HEMT; microwave transmission lines; MMIC.

***Введение***

В последние несколько лет происходит интенсивная замена GaAs СВЧ МИС на соответствующие интегральные схемы, выполненные по GaN-технологиям [1]. Это обусловлено не только хорошими динамическими характеристиками двумерного электронного газа в гетеропереходе AlGaN/GaN, но и более высокими параметрами надежности таких приборов. С экономической точки зрения наиболее эффективной является подложка из кремния, однако рассогласование кристаллических решеток и ТКЛР между GaN и Si приводит не только к проблемам с кристаллически совершенным ростом эпитаксиальных гетероструктур, но и значительным потерям СВЧ-сигнала в линиях передач.

Считается, что основные потери образуются в объеме кремниевой подложки и на границе раздела подложки с гетероструктурой AlGaN/GaN. Однако вопросы, касающиеся природы их возникновения, до сих пор остаются предметом обсуждений [2]. В связи с этим возникает необходимость в аналитическом и экспериментальном анализе потерь СВЧ-сигнала в линиях передач на различных зародышевых структурах, предназначенных для роста GaN/Si HEMT и МИС на их основе.

***Методика и результаты***

В настоящей работе предложена методика оценки потерь СВЧ-сигнала в линиях передач на Si-подложках с различным уровнем резистивности, а также на зародышевых структурах AlN/Si, предназначенных для создания GaN/Si СВЧ МИС. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Экспериментальными методами проведена верификация результатов трехмерного электромагнитного моделирования потерь СВЧ-сигнала в копланарных линиях передач.

Определено, что кремниевая подложка с удельным сопротивлением 5 кОм·см может считаться оптимальной для формирования GaN/Si СВЧ МИС (рис. 1). Однако для снижения проводимости паразитного канала требуется решение ряда технологических проблем по повышению качества роста нитридных слоев на Si-пластинах.

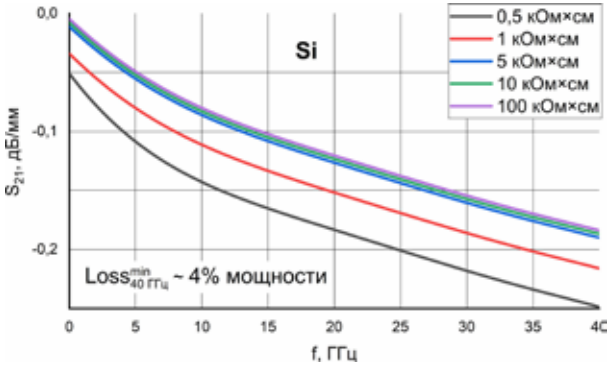



**Рис. 1.** Потери в копланарных линиях передач на Si-подложке с различным удельным сопротивлением (моделирование)

***Литература***

1. Баранов Г. В., Дорофеев А. А., Красников Г. Я., Леоненков Е. И., Панасенко П. В. Анализ приборных требований к эпитаксиальным структурам GaN на Si под HEMT для силовых и СВЧ-приложений // Микроэлектроника-2019. Технологии и компоненты микро- и наноэлектроники, 2019. — С. 147–148.
2. Berber F. et al. RF dielectric loss due to MOCVD aluminum nitride on high resistivity silicon // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017. V. 65. № 5. P. 1465–1470.

УДК 621.383 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.782.783

# Анализ технологических платформ производства интегральных радиофотонных схем

## Analysing Technological Platforms for Integred Radiophoton Circuits

**Скуратов И. Д.**
***м. н. с.[1], аспирант[2]***
*iskuratov@niime.ru*

**Баранов Г. В., к. ф.-м. н.**
***нач. лаб.[1]***
*gbaranov@niime.ru*

**Панасенко П. В., д. т. н.**
*Зам. ГД[2], профессор*
*ppanasenko@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Skuratov I. D.**
***junior researcher[1], postgraduate[2]***
*iskuratov@niime.ru*

**Baranov G. V., Ph.D**
***research group leader[1]***
*gbaranov@niime.ru*

**Panasenko P. V., Sc.D**
***Deputy General Director[1], professor***
*ppanasenko@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

Произведен функциональный анализ технологических платформ интегральной радиофотоники. Рассмотрены решения на базе кремния на изоляторе с толстым приборным слоем, кремния на изоляторе с тонким приборным слоем, InP, Ge и SiN. Показаны их особенности и оптимальные области применения. Показаны различия в конструктивных решениях для стандартных элементов интегральной радиофотоники.
**Ключевые слова:** радиофотоника; кремний на изоляторе; InP; SiN.

The paper deals with a functional analysis of the integrated radio photonics technological platforms. Solutions based on silicon on an insulator with a thick device layer,

silicon on an insulator with a thin device layer, InP, Ge and SiN have been considered. Their features and optimal areas of application have been shown, as well as differences in design solutions for standard elements of integred radio-photonics.
**Keywords:** radiophotonics; silicon on insulator; InP; SiN.

***Описание работы***

Базовыми материалами для изготовления радиофотонных интегральных схем являются элементы IV группы таблицы Менделеева, такие как Si, Ge, O и N, и элементы III–V групп, а именно In, P, Ga, As и Al [1]. Материалы на основе III–V групп при этом являются прямозонными полупроводниками, что позволяет строить на их основе эффективные лазеры. Материалы на основе IV группы при этом значительно более распространены. Высокая контрастность в показателе преломления между материалами IV группы и их оксидами позволяет создавать на их основе малоразмерные и эффективные волноводы (рис. 1). Данные различия определяют функциональные назначения соответствующих технологических платформ. Материалы III–V групп используются в оптоэлектронных устройствах, требующих высокого уровня оптического усиления. Материалы IV группы используются для компактных устройств, требующих точного контроля поляризации и фазы света [2]. Однако у вышеописанных эмпирических правил есть множество исключений. В данной работе рассмотрены особенности различных технологических платформ, проведен анализ конструктивных решений и методов их взаимной интеграции.

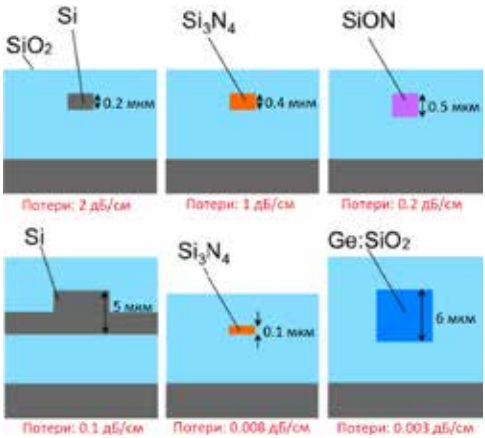



**Рис. 1.** Различия в конструктиве и потерях волноводных линий для различных материалов IV группы

***Литература***

1. Doerr C. R. Integrated photonic platforms for telecommunications: InP and Si // IEICE transactions on electronics, 2013. V. 96. № 7. P. 950–957.
2. Rahim A. et al. Open-access silicon photonics: Current status and emerging initiatives // Proceedings of the IEEE, 2018. V. 106. № 12. P. 2313–2330.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.784.785

# Исследования конфигурации топологических элементов СБИС и разработка алгоритма генерации библиотек тестовых структур

## Studies of the Configuration of VLSI Topological Elements and the Development of an Algorithm for Generating Test Structures Libraries

**Сахащик У. А.**
***младший научный сотрудник*[1,2]**
*usahashchik@niime.ru*

**Соколова Е. В.**
***инженер-конструктор 1-й категории*[1]**
*evsokolova@niime.ru*

[1] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
[2] *Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Sahashchik U. A.**
***technician*[1,2]**
*usahashchik@niime.ru*

**Sokolova E. V.**
***design engineer*[1]**
*evsocolova@niime.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В данной статье представлена разработка алгоритма для генерации универсальной библиотеки тестовых структур для технологии 28 нм.
**Ключевые слова:** фотолитография; экстракция; библиотека тестовых структур; 28 нм.

The paper presents the development of an algorithm for universal clips library generation. It can be used for 28 nm and below technology nodes.
**Keywords:** photolithography; extraction; library clips; 28 nm.

При формировании OPC-рецепта на этапе разработки новой технологии появляется необходимость в универсальном наборе тестовых ячеек. Данные ячейки представляют собой структуры различной конфигурации, ориентированные на спроектированную топологию кристалла. Такие структуры необходимы для поведения моделирования при подборе источника, а также калибровки моделей.

Следовательно, возникает потребность в инструменте, позволяющем быстро генерировать универсальный набор тестовых ячеек [1].

В качестве входных данных для анализа работы скрипта были выбраны два топологических файла:

1) сгенерированный вручную (10×10 мкм);
2) вычлененный из рабочего изделия (1004×602).

Рассматриваемый слой — металл, технологический уровень — 28 нм.

В рамках этой работы были выбраны два метода экстракции тестовых структур из топологии:

1) экстракция структур по координатам [2];
2) экстракция структур по площади перекрытия.

Для реализации данных методов были разработаны два скрипта на языке программирования TCL. В процессе выполнения скрипта входная топология разрезается на равные фрагменты размером в два оптических диаметра с шаговым сдвигом в половину оптического диаметра [3]. Далее каждый фрагмент сравнивается с остальными для поиска повторяющихся конфигураций в топологии. Если структура повторяется, программа запоминает количество повторений, тем самым определяя вес структуры по отношению ко всей топологии.

В процессе выполнения скрипта, реализующего первый метод, топология сравнивается по координатам внутренних полигонов в сформированных фрагментах. При реализации второго метода используется сравнение оставшейся площади при наложении одного фрагмента на другой.

В результате выполнения скриптов на основе выбранных методов было проведено сравнение экстракции повторяющихся структур. Результаты анализа представлены в таблице.

**Таблица 1.** Сводная таблица результатов работы

| Наименование метода | Кол-во выделенных структур в топологии 10×10 | Кол-во выделенных структур в топологии реального кристалла |
|---|---|---|
| По координатам | 2 | 10 |
| Площади перекрытия | 7 | 23 |

***Литература***

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники: в 2 томах. — Москва: Столичная энциклопедия, 2012. — С. 539–563.
2. Shim S., Chung W. and Shin Y. Synthesis of lithography test patterns through topology-oriented pattern extraction and classification // Proc. SPIE 9053, 1–11 (2014).
3. Валеев А.С., Красников Г.Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.786.787

# Моделирование профиля фоторезиста в процессе самосовмещенного двойного паттернирования с учетом коррекции проблемы горячих точек

## The Photoresist Profile Simulation in Self-aligned Double Patterning Process Taking into Account the Problem of Hot Spots Correction

**Тихонова Е. Д.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*etikhonova@niime.ru*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Tikhonova E. D.**
***research assistant[1], postgraduate[2]***
*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*etikhonova@niime.ru*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

Данное исследование посвящено проблеме неравномерности профиля фоторезиста на этапе травления в процессе самосовмещенного двойного паттернирования. Было проведено моделирование профиля фоторезиста и предложена методика, помогающая отыскать слабые места процесса и улучшить ширину линий итоговых элементов.
**Ключевые слова:** методы улучшения разрешения; самосовмещенный метод двойного паттернирования; математическое моделирование.

This study is devoted to the problem of photoresist profile irregularity at the etching stage in self-aligned double patterning process. The photoresist profile simulation has been done, and the methodology that can find the weak points of the process and improve the line width of the final elements has been proposed.
**Keywords:** resolution enhancement techniques (RET); self-aligned double patterning (SADP); mathematical simulation.

### *Введение*

В настоящее время в России идет активная подготовка к освоению и внедрению на отечественный рынок технологии 28 нм. Для ее реализации необходимо использовать комплексный набор инструментальных и технических приемов, в которых ключевую роль играет именно процесс фотолитографии [1]. Для формирования рисунка требуемых размеров возникает необходимость использования более агрессивных методов улучшения разрешения (resolution enhancement techniques, RET), таких как оптимизация маски источника (source-mask co-optimization, SMO) или применение мультипаттернирования (multi-patterning, MP).

***Постановка проблемы и подход к ее решению***

В данной работе было проведено моделирование профиля фоторезиста для процесса самосовмещенного двойного паттернирования (self-aligned double patterning, SADP) [2] с помощью программного обеспечения Prolith от разработчика KLA. Для симуляции данного процесса была выбрана строгая фоторезистивная модель, которая обычно используется в технологии 28 нм для получения линий затворов. Было исследовано, как неравномерный профиль фоторезиста, а именно потери сверху, влияют на получившееся изображение.

Проведя моделирование, удалось выяснить, что слабые места постэкспозиционной обработки тесно связаны с тем, какие потери сверху были выявлены на профиле фоторезиста [3]. Однако не всегда детектирование таких мест после верификации ведет к значительному улучшению значения верхних потерь профиля фоторезиста. В связи с этим возникла необходимость детальнее исследовать взаимосвязь стандартных показателей интенсивности воздушного изображения с верхними потерями профиля фоторезиста. Уровни интенсивности были построены по двум разрезам: вертикальному и горизонтальному.

Чтобы избежать предсказанных постэкспозиционных ошибок, выделенный слой был настроен таким образом, чтобы контур стал более гладким. Для этого контур каждого соответствующего уровня разбивается на определенные интервалы, после чего для заданных интервалов в соответствии с желаемым значением результатов литографии и травления подбирается наиболее выгодная спецификация. В результате использования данной методологии при моделировании профиля фоторезиста удалось не только получить более сглаженный контур, но и улучшить размер ширины линий после травления.

***Выводы***

По итогам проделанной работы была предложена новая модель, в которой для оценки профиля рисунка на основных этапах травления используются уровни разной интенсивности, полученные при моделировании воздушного изображения. Таким образом, удается восстановить двумерное распределение интенсивности профиля линий, которое помогает заранее предугадать слабые места, возникающие после травления, а также уменьшить верхние потери профиля фоторезиста, что в итоге дает нам более стабильный результат критических размеров линий после травления.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
2. Тихонова Е. Д., Горнев Е. С. Использование материала spin-on-carbon для улучшения метода самосовмещенного двойного паттернирования // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-3 (102). — С. 859–861.
3. Furubayashi Ken Mask defect printability in the Self-Aligned Quadruple Patterning (SAQP) process / Ken Furubayashi, Koutarou Sho, Seiro Miyoshi, Shinji Yamaguchi, Kazunori Iida, Satoshi Usui, Tsuyoshi Morisaki, Naoki Sato, Hidefumi Mukai // Proc. SPIE 978: Optical Microlithography XXIX, 2016. V. 97800O. P. 7.

УДК 621.385 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.788.790

# Диагностика сканирующего электронного микроскопа на наличие системных и случайных ошибок в процессе фотолитографии

## Diagnostics of the Scanning Electronic Microscope for the System and Random Errors Presence in Photolithography

**Тихонова Е. Д.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*etikhonova@niime.ru*

**Билданов М. А.**
***инженер-технолог[3], специалист по разработке технологий[3]***
*mbildanov@mikron.ru*

**Горнев Е. С., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор**
***начальник управления РПТН[1]***
*egornev@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[3] ПАО «Микрон»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Tikhonova E. D.**
***research assistant[1], postgraduate[2]***
*yelena.tikhonova@phystech.edu*

**Bildanov M. A.**
***process engineer[3], technology development specialist[3]***
*mbildanov@mikron.ru*

**Gornev E. S., corresponding member of RAS, Sc.D, professor**
***head of PTD management[1]***
*egornev@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*[3] Mikron JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В настоящей работе были исследованы два сканирующих электронных микроскопа на предмет наличия случайных и систематических ошибок и был предложен подход, основанный на изучении средних контуров элементов, для устранения данных ошибок.

**Ключевые слова:** сканирующий электронный микроскоп (СЭМ); шероховатость ширины линии; шероховатость ширины пространства; шероховатость края линии.

The paper considers two scanning electron microscopes for the presence of random and systematic errors, as well as offers an approach based on the study of the average contours of elements to eliminate these errors.
**Keywords:** scanning electron microscope (SEM); line width roughness (LWR); space width roughness (SWR); line edge roughness (LER).

***Введение и проблематика***

По мере увеличения требований к разрешению фотолитографического процесса растет число воспроизводимых циклов процесса фотолитографии [1]. В связи с этим возникает потребность тщательного контроля критических размеров на пластине, точность которых при производстве в большинстве случаев обеспечивает сканирующий электронный микроскоп (СЭМ).

Системные и случайные ошибки, возникающие в данном контрольно-измерительном оборудовании, оказывают значительное влияние на правильность и аккуратность проводимого анализа не только при определении критических размеров (critical dimension, CD) элементов, но и при измерении шероховатости: ширины линии (linewidth roughness, LWR), ширины пространства (space width roughness, SWR), края линии (line-edge roughness, LER) и других ее разновидностей [2]. Причем одни и те же ошибки способны по-разному влиять на расчеты тех или иных параметров.

***Проведенные исследования и результаты***

В данной работе были рассмотрены два сканирующих электронных микроскопа: Hitachi CD-SEM (critical dimension scanning electron microscope) серии S-9380II и серии S-9260A. Для обеспечения единства измерений оба микроскопа были откалиброваны по эталонным образцам — мерам малой длины. Были проанализированы данные огромного массива линий и промежутков между ними, изготовленных по технологии 90 нм, с 12 пластин диаметром 300 мм, причем каждая была промерена два раза разными микроскопами.

Полученные в каждой партии изображения были проанализированы на соответствие номинальным значениям, были рассчитаны средние по партии вариации CD, LER, LWR, SWR и другие стандартные отклонения. Построенные графики зависимости сходимости измерений от изображения к изображению для S-9380II и S-9260A показали значительное расхождение в результатах: первый СЭМ демонстрирует ожидаемый разброс, в то время как корреляции второго выходят за границы допуска и в некоторых точках демонстрируют аномальное поведение.

В связи с этим были изучены средние контуры каждого элемента с разных микроскопов. При их расчете стандартные отклонения и шумы усредняются, в результате чего перед нами остаются лишь систематические ошибки прибора. Таким образом, удалось выяснить, что каждый СЭМ имеет уникальную сигнатуру ошибок сканирования. Кроме того, характер этих ошибок может меняться в зависимости от настроек сканирующего электронного микроскопа, однако будет являться постоянным при измерении пластин из одной партии. Следовательно, отыскав сигнатуру систематических ошибок CD-SEM-прибора, можно повысить точность и достоверность измерений шероховатости линий элементов.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 частях. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2004. — 536 с.
2. Lane Barton Global minimization line-edge roughness analysis of top down SEM images / Barton Lane, Chris Mack, Nasim Eibagi, Peter Ventzek // Metrology, Inspection and Process Control for Microlithography XXXI: Proc. SPIE, 2017. V. 10145. № 101450Y. P. 12.

УДК 621.793.162 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.791.793

# Плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния

## Atomic Layer Deposition of Thin Films of Hafnium Oxide Using Izofaz TM 200-01 System

**Зюзин С. С.**
***инженер-технолог 2-й кат.[1], аспирант[2]***
*szyuzin@niime.ru*

**Резванов А. А., к. ф.-м. н.**
***начальник лаборатории[1]***
*arezvanov@niime.ru*

**Горнев Е. С., член-корр. РАН, д. т. н., профессор**
***начальник управления РПТН[1]***
*egornev@niime.ru*

**Панин В. В., к. т. н.**
***начальник ОИиИ[3]***
*vita-panin@yandex.ru*

**Гвоздев В. А.**
***инженер-технолог 1-й кат.[1]***
*vgvozdev@niime.ru*

**Зассеев Я. Г.**
***инженер-технолог[3]***
*zasse95@yandex.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*[3] АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10*

**Zyuzin S. S.**
***process engineer 2 cat.[1], postgraduate[2]***
*szyuzin@niime.ru*

**Rezvanov A. A.**
***Ph.D, head of the laboratory[1]***
*arezvanov@niime.ru*

**Gornev E. S., corresponding member of RAS, Sc.D, professor**
***head of PTD management[1]***
*egornev@niime.ru*

**Panin V. V., Ph.D**
***head of R&T department[3]***
*vita-panin@yandex.ru*

**Gvozdev V. A.**
***process engineer 1 cat.***[1]
*vgvozdev@niime.ru*

**Zasseyev Y. G.**
***process engineer***[3]
*zasse95@yandex.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
[3] *Reasearch Institute of Precision Machine Manufacturing (NIITM) JSC*
*10 Panfilovsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460*

В работе приведены некоторые результаты атомно-слоевого осаждения тонких пленок оксида гафния на новой установке российского производства «Изофаз ТМ 200-01».
**Ключевые слова:** атомно-слоевое осаждение; ALD; оксид гафния.

This paper presents some results of atomic layer deposition of hafnium oxide using the novel Russian ALD system Izofaz TM 200-01.
**Keywords:** atomic layer deposition; ALD; hafnium oxide.

***Введение***

Атомно-слоевое осаждение (ALD) — это современный нанотехнологический процесс [1, 2], который применяется для нанесения сверхтонких слоев различных структур, в частности широко применяемых в микроэлектронике high-k-диэлектриков [3].

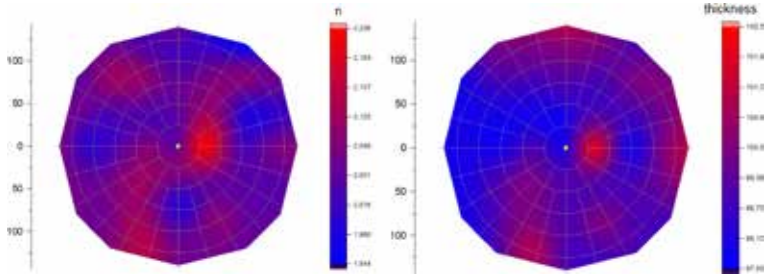
Цель данной работы — продемонстрировать возможности новейшей российской установки для атомно-слоевого осаждения «Изофаз ТМ 200-01» [4]. Данная система позволяет проводить плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение тонких пленок на кремниевые пластины диаметром до 200 мм.

***Эксперимент***

Для осаждения тонких пленок $HfO_2$ на кремниевые пластины диаметром 200 мм применялся прекурсор ТЕМАН (тетракис(этилметиламино)гафний(IV)) с аргоном в качестве газа-носителя. Вторым прекурсором были атомы кислорода O, полученные путем разложения кислорода $O_2$ в источнике плазмы мощностью 250 Вт. Процесс проводился при температуре 300 °C.

***Результаты***

Были получены пленки $HfO_2$ различной толщины (100–300 Å) с неравномерностью $\sigma \leq 2\%$. Скорость роста пленок $HfO_2$ составила более 1 Å/цикл. Коэффициент преломления пленок находится в табличных пределах для $HfO_2$ (табл. 1.9–2.07, эксп. 2.01–2.07). Типичные данные по пластине приведены на рис. 1; для примера взята пластина, на которой было проведено 100 циклов осаждения пленки $HfO_2$.




*а* *б*

**Рис. 1.** Цветовая визуализация данных по коэффициенту преломления (*а*) и толщине (*б*) пленки $HfO_2$ на пластине

Полученные данные показывают, что установка успешно справляется с атомно-слоевым осаждением. Есть возможности для оптимизации процесса и улучшения параметров получаемых пленок, что является направлением для дальнейшей работы.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. — М.: Столичная энциклопедия, 2012. — С. 510–538.
2. George S. M. Atomic layer deposition: an overview // Chemical reviews, 2009. V. 110. № 1. P. 111–131.
3. Arghavani R. et al. High-k/Metal Gates for High-Volume Manufacturing // Nanochip Technology Journal, 2007. V. 5. № 2. P. 2–7.
4. Одиноков В. В. и др. Установка Изофаз ТМ 200-01 для термического и плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения Al2O3 // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2019. — Т. 1. — № 1. — С. 10–14.

УДК 004.33.087.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.794.796

# Исследование особенностей экстракции параметров модели мемристора

## Research on Properties of Memristor Model Parameters Extraction

**Шамин Е. С.**
***н. с.[1], аспирант[2]***
*eshamin@niime.ru*

**Жевненко Д. А.**
***с. н. с.[1], аспирант[2]***
*DmitryZhev@yandex.ru*

**Мещанинов Ф. П.**
***н. с.[1], аспирант[2]***
*fmeshaninov@yandex.ru*

**Кожевников В. С.**
***н. с.[1], студент[2]***
*vladislavkozhevnikov@gmail.com*

**Горнев Е. С., чл.-корр. РАН, д. т. н. профессор[1]**
***начальник управления РПТН[2]***
*egornev@niime.ru*

*[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[2] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Shamin E. S.**
***postgraduate[1], researcher[2]***
*eshamin@niime.ru*

**Zhevnenko D. A.**
***postgraduate[1], senior researcher[2]***
*DmitryZhev@yandex.ru*

**Meshchaninov F. P.**
***postgraduate[1], researcher[2]***
*fmeshaninov@yandex.ru*

**Kozhevnikov V. S.**
***master student[1], researcher[2]***
*vladislavkozhevnikov@gmail.com*

**Gornev E. S., Corresponding Member of RAS, Sc.D, Professor[1]**
***head of PTD management[2]***
*egornev@niime.ru*

[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В центре внимания данной работы находится вопрос экстракции параметров компактных моделей мемристора. К рассмотрению предлагается разработанный программный пакет Visualizer, упрощающий анализ исследуемой модели и использование связанных с ней оптимизационных алгоритмов.
**Ключевые слова:** мемристор; обратная задача; оптимизация; модель мемристора.

The focus of this work is on the issue of compact memristor models parameters extraction. The developed Visualizer software package has been presented. It simplifies the analysis of the memristor model under study and usage of associated optimization algorithms.
**Keywords:** memristor; inverse problem; optimization; memristor model.

### *Введение и проблематика*

Одним из основных вопросов, возникающих при работе с эмпирическими моделями мемристора, является вопрос экстракции модельных параметров из эксперимента. Чаще всего эта операция проводится посредством применения алгоритмов оптимизации или иначе с помощью аппроксимации экспериментального контура моделью. Такая операция в зависимости от сложности выбранного алгоритма, целевой функции, модели мемристора и экспериментальных данных (например, даже для одного устройства может иметь место значительный разброс напряжений переключения в разных циклах работы [1]) может занимать значительное время.

На сегодняшний день вопрос выбора оптимального алгоритма оптимизации — задача в общем смысле не решенная [2]. Более того, как указано в [3], эффективность алгоритмов и их параметров неразрывно связана с задачей, для которой они применяются. Таким образом, исследования, направленные на улучшение качества аппроксимации в каждом конкретном случае, имеют важное прикладное значение.

### *Описание подхода к решению проблемы*

В работе предлагается к рассмотрению разработанное программное средство под названием Visualizer, интерфейс которого представлен на рис. 1. Данный инструмент удобен для исследования взаимосвязей между параметрами рассматриваемой модели мемристора и особенностями соответствующих им вольт-амперных характеристик. Также его можно использовать для сравнения различных алгоритмов решения задачи экстракции между собой.

В работе приводится краткое описание принципов работы программного средства Visualizer, а также анализ особенностей поведения модели модификации подвижности [4], на основе которой показан пример его использования. Рассматриваются вопросы о влиянии параметров модели на форму контура вольт-амперной характеристики.

Дополнительно демонстрируются результаты по выбору наилучшего алгоритма оптимизации для задачи экстракции, полученные с помощью разработанного программного средства.

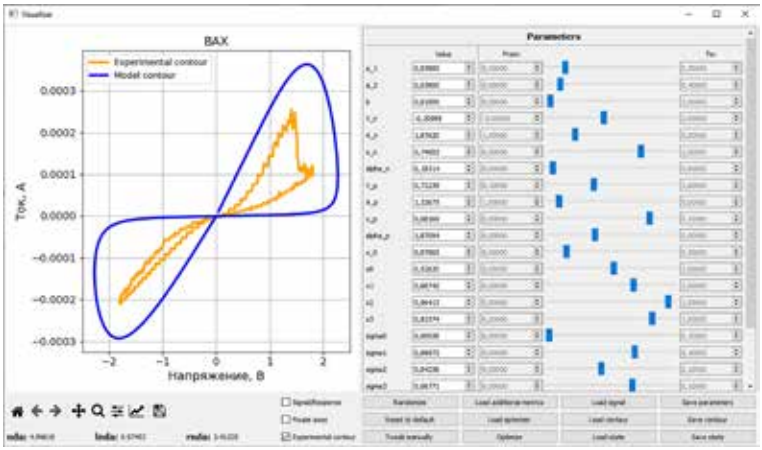



**Рис. 1.** Интерфейс программного средства Visualizer

***Литература***

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: в 3 ч // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. — Ч. 1. — 2017. — Вып. 1 (165). — С. 59–63; Ч. 2. —2017. — Вып. 4 (168). — С. 16–41; Ч. 3. — 2018. — Вып. 3 (171). — С. 63–93.
2. Bartz-Beielstein T. et al. Benchmarking in optimization: Best practice and open issues. arXiv preprint arXiv:2007.03488, 2020.
3. Brownlee J. et al. A note on research methodology and benchmarking optimization algorithms // Complex Intelligent Systems Laboratory (CIS), Centre for Information Technology Research (CITR), Faculty of Information and Communication Technologies (ICT), Swinburne University of Technology, Victoria, Australia, Technical Report ID, 2007. V. 70125.
4. Zhevnenko D. et al. Simulation of memristor switching time series in response to spike-like signal // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. V. 142. P. 110382.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.797.798

# Физическая модель резистивного переключения в ReRAM-структурах на основе оксида гафния

## Physical Model of Resistive Switching in ReRAM Structures Based on Hafnium Oxide

**Ганыкина Е. А.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*eganykina@niime.ru*

**Резванов А. А., к. ф.-м. н.**
***начальник лаборатории[1]***
*arezvanov@niime.ru*

**Горнев Е. С., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор**
***начальник управления РПТН[1]***
*egornev@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Ganykina E. A.**
***research assistant[1], postgraduate[2]***
*eganykina@niime.ru*

**Rezvanov A. A., Ph.D**
***head of the laboratory[1]***
*arezvanov@niime.ru*

**Gornev E. S., corresponding member of RAS, Sc.D, professor**
***head of PTD management [1]***
*egornev@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В настоящей работе представлена физическая модель мемристора Au/Ti/$HfO_2$/Au/Si на основе оксида гафния, описывающая перенос ионов кислорода, теплопередачу, а также протекание электрического тока через структуру.
**Ключевые слова:** оксид гафния; резистивное переключение; проводящий филамент; SET; RESET.

This paper presents a physical model of an Au/Ti/$HfO_2$/Au/Si memristor based on hafnium oxide describing three main physical effects: diffusion and thermophoresis of oxygen vacancies, heat transfer and electric current flow.
**Keywords:** hafnium oxide; resistive switching; conductive filament; SET; RESET.

***Введение***

В настоящее время ReRAM-память является одним из наиболее перспективных видов памяти благодаря энергонезависимости, совместимости с КМОП-технологией и высокой скорости работы, что, в свою очередь, позволяет эффективно использовать ее для нейроморфных вычислений [1].

Для четкого понимания работы такого вида устройств необходимо тщательное изучение физики транспортного механизма кислородных ионов внутри резистивного слоя оксида.

***Описание модели***

В работе рассматривается мемристорная структура на основе оксида гафния — $Au/Ti/HfO_2/Au/Si$. При подаче положительного напряжения на верхний электрод начинается формирование проводящего филамента, что приводит устройство в состояние SET. При смене полярности происходит разрыв филамента и изменение состояние устройства с SET на RESET [2].

В модели совместно решаются три уравнения для вычисления концентрации кислородных вакансий $n_v$, электрического потенциала V и температуры T: уравнение диффузии кислородных вакансий, уравнение непрерывности и уравнение теплопроводности.

Благодаря объединению нескольких физических эффектов: дрейфа, диффузии и термодиффузии, кислородные вакансии образуют проводящий слой внутри слоя диэлектрика [3].

Данная физическая модель мемристора количественно объясняет динамический процесс резистивного переключения.

***Выводы***

В работе представлена теоретическая модель мемристора на основе оксида гафния, с помощью которой были получены распределения концентрации кислородных вакансий, электрического потенциала и температуры в процессах SET и RESET.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — №4 (177). — С. 60–64.
2. Goux L. OxRAM technology development and performances // Advances in Non-volatile Memory and Storage Technology, 2019. P. 3–33.
3. Larentis S. et al. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM—Part II: Modeling // IEEE Transactions on Electron Devices, 2012. V. 59. №9. P. 2468–2475.

УДК 51-74 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.799.800

# Разработка алгоритма поиска якорной структуры для одновременной оптимизации источника освещения и маски

## Anchor Structure Search Algorithm for SMO

**Соколова Е. В.**
***инженер-конструктор 1-й кат.*[1].**
*evsokolova@niime.ru*

**Балан Н. Н., к. т. н.**
***ведущий инженер-конструктор*[1]**
*nbalan@niime.ru*

[1] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Sokolova E. V.**
***engineer*[1]**
*evsokolova@niime.ru*

**Balan N. N.**
***engineer*[1]**
*nbalan@niime.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В данной работе описывается алгоритм выбора якорной структуры для этапа SMO, позволяющий значительно сократить временные затраты этапа оптимизации источника.
**Ключевые слова:** фотолитография; якорная структура; воздушное изображение; SMO; клип.

The paper presents an algorithm of searching the anchor feature for the SMO stage.
**Keywords:** photolithography; anchor structure; aerial image; SMO; clip.

Большое влияние на результат одновременной оптимизации источника освещения и маски (SMO — source-mask optimization) оказывает якорная структура — тестовая структура, для которой размер на пластине заведомо известен. С помощью данной структуры можно определить пороговое значение интенсивности. Выбор якорной структуры осуществляется последовательным запуском расчета SMO для полного набора клипов с последующей оценкой параметра наклона кривой интенсивности (ILS — image log-slope) [1]. Такой подход чреват большим временем расчета, а также пропуском наилучшего варианта. Для решения этой проблемы предлагается алгоритм поиска якорной структуры на основе анализа воздушного изображения полного набора входных клипов.

Для получения начальной формы источника запускается первая итерация SMO без использования якорной структуры с номинальным пороговым значением интенсивности. Полученные в итоге файл с координатами измерений и скорректированная топология также будут использоваться для анализа.

В каждом клипе проводятся измерения интенсивности на границе контролируемого элемента с шагом в 1 нм с подсчетом градиента интенсивности на участке в 2 нм. Далее определяется порог интенсивности, дающий наибольшее значение градиента по всем клипам.

Для определения оптимального значения ширины якорной структуры генерируется набор тестовых ячеек с изменением контролируемого размера в диапазоне ±15 нм от минимальной ширины линии. Выбирается тип структуры, рассматриваются горизонтальные, вертикальные периодические линии и матрица контактов. Далее с помощью расчета интенсивности с использованием выбранного порога определяется итоговая ширина структуры. Выбор якоря осуществляется в пользу структуры, дающей минимальное отклонение результатов моделирования от целевого размера.

***Результаты***

Реализация описанного алгоритма сделана на платформе САПР Calibre Work Bench на языке TCL. В качестве пробного запуска использовались тестовые структуры для слоя Active технологического уровня 28 нм. Использование предложенного алгоритма позволило определить наиболее эффективную якорную структуру с помощью одной итерации SMO, что дает весомый выигрыш во времени моделирования.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
2. Chris Mack. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.

УДК 004.3.122 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.801.802

# Создание модуля автоматизации расчета режима работы биполярного транзистора

## Designing an Automation Module for Calculating the Operating Mode of the Bipolar Transistor

**Рябухин В. Е.**
***студент***
*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*
*vitas900@gmail.com*

**Ryabukhin V. E.**
***student***
*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*
*vitas900@gmail.com*

В работе приведены некоторые методы анализа линейности участков переходной кривой биполярного транзистора, решена задача выбора данных участков при помощи многофакторного анализа, разработано ПО для автоматизации выбора участков переходной кривой под данные пользователя.
**Ключевые слова:** биполярный транзистор; усиление; переходная кривая; режим работы транзистора; нелинейные искажения.

The paper presents some methods for analyzing the linearity of sections of the transition curve of a bipolar transistor, as well as solves the problem of selecting these sections using multifactor analysis. Besides, it considers the software for automating the selection of sections of the transition curve according to user data.
**Keywords:** bipolar transistor; gain; transition curve; transistor operation mode; nonlinear distortions.

### *Введение*

Для работы современных устройств обработки и анализа сигналов необходимо иметь входной сигнал высокой чистоты. Однако в измерительной аппаратуре зачастую приходится усиливать входной сигнал в связи с малыми амплитудами напряжения или тока. Потому во входные цепи нередко устанавливаются дополнительные усилительные каскады или отдельные усилители.

Наиболее остро стоит вопрос нелинейных искажений, связанных с физическими принципами, лежащими в основе транзисторов — усилительных элементов схемы. Из-за нелинейной характеристики p-n-перехода при расчете усилителей необходимо искать наиболее линейный участок переходной кривой, который обеспечит минимум искажений выходного сигнала по сравнению с входным [1].

### *Предлагаемое решение*

Нами было проведено моделирование методов подбора участков переходной кривой и разработаны способы оценки их линейности. Переходная кривая строилась на основе метода треугольников, в котором указывались нагрузочная прямая

и характеристики транзистора. На кривой с помощью заданного алгоритма находился наиболее линейный участок.

Характеристики данного отрезка определяют КПД, амплитуду выходного сигнала, коэффициент искажений и режим работы по постоянному току. Реализована возможность вариации участков с использованием графического интерфейса. Также реализован выбор алгоритма анализа линейности участка, состоящий из следующих вариантов:

- метод среднеквадратичного отклонения;
- метод минимальных площадей между графиками;
- метод среднего угла наклона касательной к кривой.

Готовое решение реализовано при помощи языков программирования C++ и Python.

***Выводы***

Данное программное обеспечение позволяет при наличии входных и выходных характеристик транзистора подобрать оптимальный отрезок на переходной кривой под задачи пользователя. Для любого из представленных пользователю отрезков будут рассчитаны относительное число нелинейных искажений, амплитуды входного и выходного сигналов, режим работы по постоянному току и коэффициент усиления.

***Литература***

1. LibreTexts: Engineering Library. Nonlinear Distortion. — URL: https://eng.libretexts.org/@go/page/46121 (дата обращения: 20.06.2021).

УДК 538.958 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.803.804

# Сверхбыстрая динамика носителей заряда в $MoS_2$ на подложке $SiO_2/Si$

## Ultrafast Dynamics of Carriers in $MoS_2$ on $SiO_2/Si$ Substrate

**Лебедева Е. Д.**
***студент бакалавриата***
*caterina-lebedewa2015@yandex.ru*

**Пименов Н. Ю.**
***аспирант, стажер-исследователь***
*nikitapimenov13@gmail.com*

**Брехов К. А., к. ф.-м. н.**
***научный сотрудник***
*brekhov_ka@mail.ru*

**Лавров С. Д., к. ф.-м. н.**
***старший научный сотрудник***
*lavrov_s@mirea.ru*

*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

**Lebedeva E. D.**
***bachelor student***
*caterina-lebedewa2015@yandex.ru*

**Pimenov N. Y.**
***postgraduate, intern-researcher***
*nikitapimenov13@gmail.com*

**Brekhov K. A., Ph.D**
***researcher***
*brekhov_ka@mail.ru*

**Lavrov S. D., Ph.D**
***senior researcher***
*lavrov_s@mirea.ru*

*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

В работе представлены результаты исследования процессов релаксации электронной подсистемы в монослойном $MoS_2$ на подложке $SiO_2/Si$. Выделен вклад подложки в характерные времена релаксации электронной подсистемы изучаемой структуры и оценены времена релаксации непосредственно ДПМ.
**Ключевые слова:** двумерные дихалькогениды переходных металлов; влияние подложки; спектроскопия временного разрешения.

This work presents the results of studying the $MoS_2$ monolayer on a $SiO_2/Si$ substrate electronic subsystem relaxation. The substrate contribution to the electronic subsystem

relaxation times has been determinated, and the relaxation times of the TMD have been estimated.

**Keywords:** two-dimensional transition metal dichalcogenides; substrate effect; time-resolved spectroscopy.

Двумерные дихалькогениды переходных металлов являются полупроводниками и обладают прямой запрещенной зоной с шириной 1–2 эВ. Также ДПМ характеризуются эффективной фотолюминесценцией и высокой подвижностью носителей заряда. Все это позволяет создавать на основе монослойных кристаллитов ДПМ гибкие высокоэффективные устройства, такие как датчики газа, солнечные элементы, терагерцевые антенны, светодиоды [1]. Кроме того, стоит отметить, что была продемонстрирована возможность использования данных материалов в качестве высокоэффективных оптических насыщающихся поглотителей, предназначенных для создания модуляции добротности и синхронизации мод в резонаторах волоконных лазеров [2]. Это возможно из-за сверхбыстрой релаксации электронной подсистемы в ДПМ.

Малые времена релаксации электронной подсистемы являются ключевым свойством, отвечающим за скорость оптического просветления и, соответственно, за временные характеристики импульсных лазеров с модуляцией добротности.

В связи с тем что исследовать монослой ДПМ возможно только в комплексе с подложкой, следует учитывать, что монослойный кристаллит ДПМ и $SiO_2$ частично прозрачны в видимом диапазоне оптического излучения, а Si — полупроводник. Это означает, что значительная часть накачки, пройдя через двумерный ДПМ, передает энергию в подложку, возбуждая ее. Таким образом, подложка оказывает существенное влияние на детектирование процессов возбуждения и релаксации электронов и дырок в двумерных кристаллитах ДПМ, а также на оценку характерных времен этих процессов, что может привести к ошибкам расчета быстродействия устройств оптоэлектроники.

***Выводы***

В данной работе представлены результаты исследования процессов релаксации электронной подсистемы в монослойных кристаллитах $MoS_2$ на подложке $SiO_2$/Si в сверхбыстром временном диапазоне. Были получены карты распределения изменения фотоиндуцированного коэффициента отражения монослоя $MoS_2$ на подложке $SiO_2$/Si. На основе экспериментальных данных были определены механизмы изменения фотоиндуцированного коэффициента отражения в Si и $MoS_2/SiO_2/Si$ в разные времена после возбуждения, выделен вклад подложки в характерные времена релаксации изучаемой структуры и оценены характерные времена релаксации электронной подсистемы непосредственно ДПМ.

***Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № FSFZ-0706-2020-0022).***

***Литература***

1. Omkaram I. et al. / Two-Dimensional Materials for Photodetector, 2018.
2. Chen B. et al. // Optics express, 2015. V. 23. № 20. P. 26723–26737.

***The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FSFZ-0706-2020-0022).***

УДК 621.3.049.774 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.805.806

# Реализация вейвлет-преобразования для фильтрации шума на основе схем программируемой логики

## Implementing the Wavelet Transform for Noise Filtering Based on Programmable Logic Schemes

**Ромашихин М. Ю.**
***студент***
*misha.romashikhin@mail.ru*

**Потехин Д. С., д. т. н., профессор, доцент**
*msyst@msyst.ru*

*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

**Romashikhin M. Y.**
***student***
*misha.romashikhin@mail.ru*

**Potekhin D. S., Sc.D, Professor**
*msyst@msyst.ru*

*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

В данной работе описывается применение вейвлет-преобразования в качестве полосового фильтра для фильтрации шума в нестационарных сигналах. Описывается алгоритм реализации вейвлет-преобразования с помощью средств высокоуровневого синтеза (HLS) для имплементации его на FPGA.
**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование; фильтрация; FPGA; HLS.

This paper describes the use of the wavelet transform as a bandpass filter for filtering noise in non-stationary signals. Besides, it offers an algorithm for implementing the wavelet transform using high-level synthesis (HLS) tools for implementing it on an FPGA.
**Keywords:** wavelet transform; filtering; FPGA; HLS.

### *Введение*

Вейвлет-преобразование является одним из основных инструментов кратномасштабного анализа нестационарных сигналов. Целью данной работы является создание на основе вейвлет-преобразования полосового фильтра.

### *Реализация вейвлет-преобразования*

Вейвлет-преобразование представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом. Как и БПФ, вейвлет-преобразование переводит сигнал из временного представления в частотно-временное.

Сложность реализации вейвлет-преобразования $O(n^2)$ заключается в том, что оно не подходит для быстрой обработки сигналов [1]. Для решения данной проблемы алгоритм представили с помощью преобразования Фурье:

$$H(f_a, f) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{f_a}} \exp\left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\gamma}{f_a} \right)^2 (f - f_a)^2 \right], \quad (1)$$

$$W(f_a, f) = H(f_a, f) \cdot S(f), \quad (2)$$

$$w_\psi(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(f_a, f) \exp(j 2\pi f t) df. \quad (3)$$

Алгоритм быстрого вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле сводится к вычислению выражений с (1)–(3) [2]. Выражение (1) представляет собой Фурье-образ вейвлета Морле. Выражение (2) представляет собой свертку выражения (1) с Фурье-образом сигнала. Полученную свертку мы подвергаем обратному преобразованию Фурье (3). На выходе получаем набор комплексных коэффициентов вейвлет-преобразования. Данный алгоритм реализован на языке программирования C++ для имплементации в виде IP-ядра на FPGA в среде Xilinx Vitis HLS 2020.2.

***Реализация фильтра***

Полосовой фильтр использует вейвлет-преобразование на основе вейвлета Морле для получения скалограммы. Для фильтрации шума скалограмма подвергается мягкому пороговому преобразованию. Преображенная скалограмма подвергается обратному вейвлет-преобразованию, в результате чего получаем отфильтрованный сигнал.

Реализованный фильтр разработан для систем обработки и анализа человеческой речи в целях фильтрации речевого сигнала от белого шума и гауссова шума [3]. Данный модуль служит предварительным модулем анализа и обработки речевой информации в устройствах анализа и синтеза речи.

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFZ-0706-2020-0022).***

***Литература***

1. Wang Bo, Takatsubo Junji, Akimune Yoshio, Tsuda Hiroshi. Fast Wavelet transform algorithm and its application health monitoring system // National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2004.
2. Карпенков А. С., Гришанович Ю. В., Потехин Д. С., Тетерин Е. П. Методика расчета целочисленного цифрового селекторного нерекурсивного фильтра с заданными добротностью и уровнем подавления // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2009. — № 6–1. — С. 79–85.
3. Потехин Д. С. Метод построения полосового фильтра с использованием вейвлет-функции Морле // Системы управления и информационные технологии, 2010. — № 1 (39). — С. 80–84.

***The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSFZ-0706-2020-0022).***

УДК 621.375.826 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.807.808

# Новые материалы для терагерцевых фотопроводящих антенн на основе тройных соединений элементов III–V групп, сформированных в виде сверхрешеток

## New Materials for Terahertz Photoconductive Antennas Based on Ternary Compounds of III-V Group Elements Formed as Superlattices

**Зайнуллин Ф. А.**
***лаборант***
*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*
*madflyzero@gmail.com*

**Zainullin F. A.**
***laboratory assistant***
*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*
*madflyzero@gmail.com*

В работе производилось моделирование физических процессов в фотопроводящих антеннах на основе сверхрешеток InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs и InGaAs/InAlAs при возбуждении лазерным пучком накачки. Исследовано влияние брэгговской решетки на поглощение антенной, получены временные формы фототока при возбуждении.
**Ключевые слова:** фотопроводящая антенна; сверхрешетка; фотовозбужденные носители заряда; терагерцевое излучение.

The work simulates physical processes in photoconductive antennas based on InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs and InGaAs/InAlAs superlattices upon excitation by a laser pumping beam. The influence of the Bragg grating on the absorption by the antenna has been investigated, and the temporal forms of the photocurrent upon excitation have been obtained.
**Keywords:** photoconductive antenna; superlattice; photoexcited charge carriers; terahertz radiation.

### *Введение*

Для создания устройств оптоэлектроники необходимым условием является разработка математических и компьютерных моделей, описывающих происходящие в этих структурах физические процессы.

### *Сверхрешетчатая структура в качестве подложки ФПА*

Основной целью работы является создание эффективных устройств нано- и оптоэлектроники на основе тройных соединений элементов III–V групп, сформированных в виде сверхрешеток. В качестве таких материалов были использованы сверхрешетчатые структуры InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs и InGaAs/InAlAs, являющиеся наиболее перспективными для применения в терагерцевой оптике. Материалы сверхрешетчатой антенны были выбраны исходя из следующих

соображений: InGaAs имеет высокую концентрацию носителей заряда при низкотемпературном росте ($10^{16}$ $см^{-3}$) [1, 2]; InAs обладает большей подвижностью в сравнении с другими полупроводниками III–V на основе As [3], что увеличивает проводимость структуры в целом и переходной ток, тем самым, увеличивается интенсивность ТГц-импульса; InAlAs проявляет повышенное включение дефектов, на которых рекомбинируют фотовозбужденные носители заряда [4], что расширяет спектр ТГц-излучения.

***Полученные результаты***

В данной работе был произведен теоретический расчет оптического поглощения в сверхрешетчатых структурах с учетом эффекта многолучевой интерференции за счет внедрения брегговской решетки. Были получены параметры распределения напряженности электрического поля в исследуемых структурах с последующей оценкой поглощения в фотопроводящем слое. Рассчитана временная форма переходного тока в фотопроводящей антенне при возбуждении оптическим лазерным пучком. Был проведен теоретический расчет времени возбуждения и времени релаксации фотовозбужденных носителей заряда.

***Работа выполнена при поддержке гранта «Университетский для молодых ученых» РТУ МИРЭА НИЧ-47.***

***Литература***

1. Galiev G. B. et al. Structural and electrophysical properties of In0.52Al0.48As/In0.53Ga0.47As/In0.52Al0.48As/InP HEMT nanoheterostructures with different combinations of InAs and GaAs inserts in quantum well // Crystallogr. Reports. 2015. Vol. 60. № 3. P. 397–405.
2. Yeo W. et al. Material properties of bulk InGaAs and InAlAs/InGaAs heterostructures grown on (111)B and (111)B misoriented by 1° towards ⟨211⟩ InP substrates // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics Inc., 2000. Vol. 77. № 26. P. 4292–4294.
3. Reid M., Fedosejevs R. Terahertz emission from (100) InAs surfaces at high excitation fluences // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. № 1. P. 011906.
4. Ponomarev D. S. et al. Enhanced terahertz emission from strain-induced InGaAs/InAlAs superlattices // J. Appl. Phys. American Institute of Physics Inc., 2019. Vol. 125. № 15. P. 151605.

***This work was supported by the Grant RTU MIREA (Grant № NICH-47).***

УДК 621.396.67 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.809.811

# Гибкая бустерная RFID-метка СВЧ-диапазона с индуктивной связью

## Flexible Booster RFID Microwave Inductive-coupled Tag

**Помелов Н. В.**
***техник[1], студент[3]***
*pomelov@phystech.edu*

**Резник А. Ю.**
***директор направления по разработке прикладных изделий RFID-идентификации[2]***
*areznik@mikron.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] ПАО «Микрон»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[3] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Pomelov N. V.**
***junior researcher[1], student[3]***
*pomelov@phystech.edu*

**Reznik A. Y.**
***Director of the Development of RFID Applied Products[2]***
*areznik@mikron.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Mikron JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе представлены конструкции бустерных антенн с индуктивной связью, описан принцип работы, приведены результаты измерений дальности считывания опытных образцов меток описанной конструкции.
**Ключевые слова:** радиочастотная идентификация; RFID; бустерная антенна; антенна с индуктивной связью.

The paper presents the designs of inductively coupled booster antennas, describes the principle of their operation, and shows the results of measuring the reading range of tags prototypes.
**Keywords:** RFID; booster antenna; inductively coupled antenna.

### *Введение*

В системах радиочастотной идентификации существует множество видов меток, у каждой своя цель и свои конструкционные особенности [3, 4].

Одним из методов реализации метки с гибким излучателем является антенна с индуктивной связью между петлевой и линейной частями [1]. В данной работе рассматривается конструкция антенны, состоящей из двух частей — петлевой и линейной — бустерной (усилительной) части (рис. 1). Такая конструкция позволяет делать излучатель сгибаемым без существенной потери дальности считывания, что может быть полезно для некоторых применений в РЧ-идентификации.

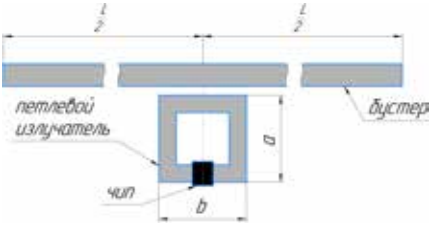



**Рис. 1.** Бустерная антенна

***Изменение конструкции и результаты***

Для функционирования радиочастотной метки с бустерной антенной требуется осуществить индуктивную связь бустера и петлевого излучателя с чипом, а также хорошо согласовать чип с антенной [2]. С этой целью была предложена конструкция, в которой бустер — не прямолинейный проводник, а проводник с петлей, обернутой вокруг рамки с чипом. Метка такой конструкции действительно имеет большую дальность считывания, однако потребовалось укорочение (уменьшение длины по сравнению с $\lambda/2 = 16$ см) бустера с петлей для хорошего согласования импеданса чипа с импедансом антенны на частоте 867 МГц. На рис. 2 представлены результаты дальности считывания меток различных конструкций с использованием квадратных петлевых излучателей и бустерного проводника.

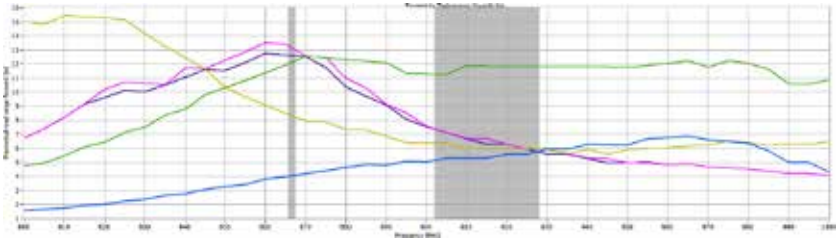


**Рис. 2.** Результаты измерения дальности считывания: песочный график — метка с двухвитковым бустером (длина 12 см), розовый — метка с двухвитковым бустером (длина 10 см), темно-синий — двухвитковый бустер с неполным перекрытием (длина 10 см), зеленый — бустер с одним витком (длина 13,5 см), светло-синий — метка конструкции [1]

Наилучшим значением дальности считывания на частоте 867 МГц обладает метка с двухвитковым бустером длины 10 см. Для данной конфигурации дальность считывания составила 13 м. По максимальной дальности считывания и по

дальности считывания на нужной нам частоте такая метка превосходит представленную в [1] конструкцию.

***Литература***


1. Raihani H., Benbassou A., El Ghzaoui M., Belkadid J. Design of a smart RFID tags antenna using an inductively coupled loop // TELECOM'2017 & 10emes JFMMA Conference.
2. Финкенцеллер К. RFID-технологии. — М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2010. — С. 95.
3. Нуйкин А. В., Кравцов А. С. Перспективы развития систем радиочастотной идентификации на основе карт памяти и микропроцессорных карт // Международная конференция «Микроэлектроника-2015», Алушта, 28 сентября — 3 2015 года. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. — С. 112–114.
4. Нуйкин А. В., Кравцов А. С. Использование RFID-технологии в экосистеме Интернета вещей // Международный форум «Микроэлектроника-2017»: Сборник тезисов 3-й Международной научной конференции, Алушта, Республика Крым, 2–7 октября 2017 года. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. — С. 279–281.

УДК 51-74 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.812.813

# Исследование влияния угла наклона стенки фотошаблона на формирование изображения в фотолитографии

## Research on the Influence of the Reticle Sidewall Angle Tilt on the Image Forming in Photolithography

**Харченко Е. Л.**
***инженер-конструктор 2-й кат.[1], аспирант[2]***
*ekharchenko@niime.ru*

**Балан Н. Н., к. т. н.**
***ведущий инженер-конструктор[1]***
*nbalan@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Kharchenko E. L.**
***design engineer[1], postgraduate[2]***
*ekharchenko@niime.ru*

**Balan N. N.**
***engineer[1]***
*nbalan@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В данной работе рассмотрены различные подходы к моделированию пропускающей способности фотошаблона (ФШ) при расчете воздушного изображения в фотолитографии. С помощью САПР Calibre Work Bench построены 3D-модели маски с различными значениями угла наклона стенки ФШ и проведено моделирование одиночных и периодических линий.
**Ключевые слова:** ФШ; моделирование; воздушное изображение; 3D-модель маски; фотолитография.

The paper considers various approaches to photomask modeling when calculating an aerial image in photolithography. With the help of CAD Calibre Work Bench, 3D mask models with different values of the sidewall angle tilts have been built and the modeling of isolated and periodic lines has been carried out.
**Keywords:** reticle; modeling; aerial image; 3D mask model; photolithography.

***Введение***

В начале развития вычислительной литографии, когда элементы фотошаблона (ФШ) были сравнительно большими относительно длины волны экспонирующего излучения, скалярная теория дифракции давала достаточно точные результаты при вычислении дифракционного спектра [1]. По мере непрерывного масштабирования размеров элементов и появления различных техник повышения разрешающей способности скалярная теория утрачивает свою актуальность. Появляется необходимость учитывать физические эффекты, которые возникают при рассеивании электромагнитного излучения на элементах, размеры которых сопоставимы или меньше длины волны [2].

На смену скалярному пришел векторный подход, который рассматривает состояние поляризации падающего света и связь полей на границах раздела среды, где распространяется свет. Строгое описание дифракции света от маски в оптической литографии может быть выполнено с использованием нескольких хорошо известных методов, таких как метод конечных разностей во временной области (FDTD) [3] или строгий анализ связанных волн (RCWA) [4]. Для достижения высокоточного описания дифрагированного поля требуются огромные вычислительные затраты. Соответственно, появилась необходимость в создании компактных моделей масок, которые смогут учесть дифракционные эффекты и быть эффективно применимы для вычисления воздушного изображения всего кристалла целиком.

***Методы***

В данной работе рассмотрены три варианта компактных моделей: модель пограничного слоя (BLM), модель импульсов (PM) и метод декомпозиции областей (DDM). В модели BLM вводится понятие вспомогательного пограничного слоя, с помощью которого возможно учесть дифракционные эффекты на гранях маски. В модели PM функция пропускания тонкой маски преобразуется путем добавления возмущений в виде δ-функций. В методе декомпозиции областей (DDM) дифракционные эффекты от горизонтальных и вертикальных граней масочных элементов рассчитываются отдельно, а затем возмущения от каждой грани суммируются.

***Выводы***

В рамках данной работы был проведен анализ существующих методов моделирования пропускающей способности ФШ. Подробно рассмотрено влияние угла наклона стенки ФШ на точность воспроизведения одиночных и периодических элементов. Также сделан вывод, что чем больше значение числовой апертуры и меньше топологический размер элемента, тем сильнее влияние угла наклона стенки ФШ и модель тонкой пленки в приближении Кирхгофа в этом случае не рекомендуется к применению.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
2. Levinson H. J. Principles of lithography. SPIE press, 2001. V. 97.
3. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on antennas and propagation, 1966. V. 14. № 3. P. 302–307.
4. Moharam M. G., Gaylord T. K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // JOSA, 1981. V. 71. № 7. P. 811–818.

УДК 004.942 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.814.816

# Моделирование устройств кремниевой фотоники

## Silicon Photonics Devices Simulation

**Будняев В. А.**
***аспирант[1], младший научный сотрудник[1], инженер[2]***
*[1] Севастопольский государственный университет*
*299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33*
*vabudnyaev@sevsu.ru*
*[2] ООО «ИЦ СевГУ»*
*г. Севастополь*

**Budnyaev V. A.**
***postgraduate[1], junior researcher[1], engineer[2]***
*[1] Sevastopol State University*
*33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053*
*vabudnyaev@sevsu.ru*
*[2] SevSU Engineering Center Ltd.*
*Sevastopol*

В работе рассмотрены особенности FDTD-моделирования двух важных устройств кремниевой фотоники — решетчатого элемента связи и микрокольцевого резонатора.
**Ключевые слова:** FDTD-метод; решетчатый элемент связи; микрокольцевой резонатор.

The paper presents FDTD simulation features of two important silicon photonics devices: grating coupler and microring resonator.
**Keywords:** FDTD method; grating coupler; microring resonator.

### *Введение*

Трехмерный метод конечных разностей во временной области (3D FDTD) — точный численный метод решения трехмерных уравнений Максвелла, который широко используется для моделирования устройств интегральной фотоники. Точность расчета растет по мере уменьшения пространственной дискретизации объема, то есть уменьшения размера сетки. Недостатком 3D FDTD является потребность в больших вычислительных ресурсах. Скорость моделирования FDTD можно значительно повысить, сведя задачу к двум измерениям.

### *Моделирование решетчатого элемента связи*

2D FDTD лучше всего применять для задач, в которых структура неизменна в одном направлении: например, решетчатые элементы связи (англ. grating coupler, GC) с прямыми решетками можно аппроксимировать решетками бесконечной длины [1]. На рис. 1 приведены зависимости эффективности связи волокно — кристалл от длины волны для 3D- и 2D-модели кремниевого GC с периодом решетки 0,63 мкм.

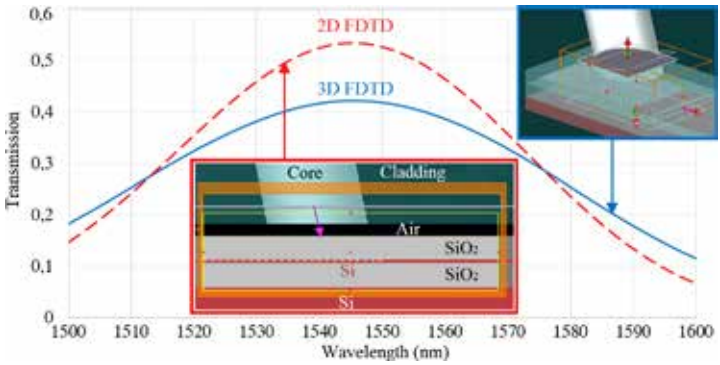



**Рис. 1.** Эффективность связи для 3D- и 2D-модели GC

***Моделирование микрокольцевого резонатора***

Расширить возможности двумерного моделирования позволяет комбинация 2D FDTD и метода эффективного показателя преломления, также известная как 2.5D FDTD. Данный метод позволяет быстро моделировать структуры со сложной геометрией, такие как микрокольцевые резонаторы (МКР). При этом интересующая 3D-структура преобразуется в двумерный набор эффективных показателей преломления, который может быть решен методом 2D FDTD [2]. На рис. 2 приведены спектральные характеристики, полученные по результатам 2.5D- и 3D-моделирования МКР с диаметром 10 мкм.

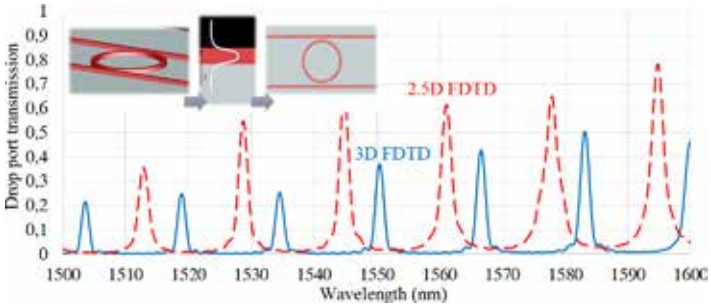



**Рис. 2.** Результаты 3D и 2.5D FDTD-моделирования МКР

***Выводы***

Для GC разница результатов моделирования (~20 % при 1550 нм) обусловлена тем, что двумерная модель учитывает потери только в одной плоскости.

Различия в спектральных характеристиках МКР связаны с тем, что 2.5D FDTD-метод предполагает отсутствие вертикальной связи между прямым волноводом и кольцом, что приводит к переоценке эффективности связи между ними.

При этом наиболее интересующий разработчика параметр МКР — свободный спектральный диапазон, одинаков для обоих методов (~16 нм).

Несмотря на то что 2D/2.5D FDTD-методы часто позволяют получить относительно точный результат за короткое время, их стоит использовать только на этапе первоначальной настройки устройства. Окончательный результат должен быть подтвержден с помощью 3D FDTD-метода.

***Литература***

1. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon Photonics Design. Cambridge University Press, 2015.
2. Lumerical's 2.5D FDTD Propagation Method [Электронный ресурс] // Ansys/Lumerical. URL: https://www.lumerical.com/learn/whitepapers/lumericals-2-5d-fdtd-propagation-method/ (дата обращения: 23.06.2021).

УДК 621.382.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.817.819

# Анализ «ложных» ошибок DRC при регрессионном тестировании командных файлов

## False Errors Analysis in DRC Deck Regression Testing

**Загидуллина О. Р.**
***инженер-конструктор 2-й категории***
*ozagidullina@niime.ru*

**Надин А. С.**
***начальник отдела***
*anadin@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Zagidullina O. R.**
***design engineer***
*ozagidullina@niime.ru*

**Nadin A. S.**
***department head[1]***
*anadin@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В работе предложен метод анализа и последующей фильтрации «ложных» результатов регрессионного тестирования, возникающих из-за сдвига базы данных САПР для физической верификации при регрессионном анализе DRC deck и аттестации новых версий САПР.
**Ключевые слова:** DRC deck; quality assurance; САПР; физическая верификация; регрессионное тестирование; waiver.

The paper proposes a method for analyzing and filtering “false” regression testing results arising from a shift in the physical verification CAD database during DRC deck regression analysis and certification of new CAD versions.
**Keywords:** DRC; QA; CAD; physical verification; regression testing.

### *Введение*

Стремительное развитие полупроводниковых технологий и уменьшение проектных норм приводят к постоянному совершенствованию и обновлению версий САПР физической верификации [1], которые необходимо внедрять в маршрут проектирования СБИС, а также к значительному увеличению количества правил проверок норм проектирования DRC за счет появления новых физических эффектов: например, для полупроводниковой технологии уровня 28 нм это более 20 000 строк кода.

Таким образом, в сочетании с растущей сложностью технологического процесса увеличиваются сложность и требуемые ресурсы для валидации правил DRC и внедрения в маршрут проектирования новых версий САПР.

Одним из методов, позволяющих оценить последствия изменений версий САПР и DRC deck (командных файлов) для проведения физической верификации, является регрессионное тестирование.

***Анализ результатов регрессионного тестирования***

Для регрессионного тестирования используется база данных, полученная в ходе сравнения маркеров ошибок для двух запусков DRC:

- для контроля изменений в правилах проектирования сравниваются запуски с исходным командным файлом и с измененным;
- для аттестации новой версий программных средств верификации — с различными версиями САПР [2].

Сравнение маркеров ошибок производится с помощью логических операций, например XOR, AND NOT и т. п. Недостатком данного метода является появление результатов сравнения с размерами, не превышающими 1 dbu (data base unit). Такие результаты для регрессионного тестирования являются ложными, они связаны со спецификой работы САПР физической верификации, когда результирующая база данных может смещаться в пределах 1 dbu от запуска к запуску и не влияет на качество DRC. Для некоторых проектов количество таких результатов достигает порядка 104. Это затрудняет анализ и приводит к значительным временным затратам на проведение регрессии. Как следствие, необходимо разработать метод, позволяющий исключить такие «ложные» результаты из анализа, минимизируя тем самым время, затрачиваемое на аттестацию новых версий САПР и контроль изменений в командных файлах DRC.

***Выводы***

Авторами предложен метод фильтрации результатов регрессионного тестирования с использованием универсального механизма САПР физической верификации — waiver, который при помощи сгенерированной специальным образом входной базы данных позволяет исключить ложные результаты из анализа.

Алгоритм метода фильтрации результатов:

- анализ результатов XOR и выявление маркеров ошибок с размерами, не превышающими 1 dbu;
- обработка и генерация специализированной базы данных, содержащей координаты и описание ошибок, которые необходимо исключить из анализа;
- фильтрация результатов XOR с помощью функционала waiver.

Предложенный метод позволяет исключить из анализа ложные результаты и, как следствие, ускорить процесс аттестации командного файла DRC и внедрения новых версий САПР в маршрут проектирования СБИС.

***Литература***

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Исследование LDE-эффектов и методов аттестации файлов DRC для субмикронных технологий 90–28 нм // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 619–622.

УДК 535-31 + 547 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.819.820

# Переизлучающие тонкие пленки на основе гибридных органических материалов для кремниевых фотоэлектрических преобразователей

## Re-emitting Thin Films Based on Hybrid Organic Materials for Silicone Photoelectron Converters

**Гурченко В. С.**
***аспирант***
*gurchenko_v@mail.ru*

**Дмитриев А. И.**
***студент***
*dm.andrei.18@gmail.com*

**Тютюник А. С.**
***младший научный сотрудник***
*real-warez@mail.ru*

**Мазинов А. С.-А., к. т. н.**
***доцент***
*mazinovas@cfuv.ru*

*ФТИ КФУ им. В. И. Вернадского*
*г. Симферополь*

**Gurchenko V. S.**
***postgraduate***
*gurchenko_v@mail.ru*

**Dmitriev A. I.**
***student***
*dm.andrei.18@gmail.com*

**Tyutyunik A. S.**
***junior researcher***
*real-warez@mail.ru*

**Mazinov A. S.-A., Ph.D**
***Associate Professor***
*mazinovas@cfuv.ru*

*Institute of Physics and Technology, V. I. Vernadsky Crimean Federal University*
*Simferopol*

В работе показана возможность использования гибридных органических материалов в качестве люминесцентных солнечных переизлучателей. Установлено, что нанесение органических материалов на лицевую поверхность солнечных элементов позволяет повысить эффективность преобразователей в ультрафиолетовом спектральном диапазоне.
**Ключевые слова:** органические тонкие пленки; цинковый комплекс; солнечный элемент; оптический спектр; люминесценция.

The paper shows the possibility of using hybrid organic materials as luminescent solar re-emitters. It has been established that the application of organic materials to the front surface of solar cells makes it possible to increase the efficiency of converters in the ultraviolet spectral range.
**Keywords:** organic thin films; zinc complex; solar cell; optical spectrum; luminescence.

### *Введение*

В настоящее время развитие солнечной энергетики сопровождается разработкой различных подходов и методов, позволяющих повысить эффективность уже существующих фотопреобразующих систем [1, 2]. Разрабатываются различные антиотражающие покрытия [3], применяются различные типы концентраторов солнечного излучения как на основе геометрической оптики, так и с использованием люминесцентных материалов (люминесцентные концентраторы) [4, 5].

Перспективными, на наш взгляд, являются переизлучающие тонкие пленки, нанесенные непосредственно на поверхность кремниевых солнечных элементов. Целью настоящей работы было исследование эффектов воздействия электромагнитных волн оптического диапазона на тонкие пленки цинкового комплекса, а также параметров кремниевых фотопреобразующих устройств при добавлении дополнительного переизлучающего слоя на поверхность таких элементов.

***Результаты и обсуждение***

Одной из особенностей цинковых комплексов является поглощение ультрафиолетового спектра и переизлучение его в область видимого диапазона (450–550 нм) [6]. Учитывая тот факт, что наиболее эффективной длиной волны фотонов для кремниевых солнечных элементов является диапазон 500–600 нм, мы можем говорить о перспективности использования этих материалов в качестве люминесцентных покрытий для солнечных элементов. Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) и последующий расчет эффективности солнечных элементов показали, что добавление дополнительного переизлучающего слоя на поверхности кремниевого солнечного элемента позволяет расширить спектральную область работы фотопреобразователей, а также повысить их эффективность в ультрафиолетовом диапазоне.

***Литература***

1. Mohd Zaini F. K., Balakrishnan V., Syafiq A., Rahim N. A., Pandey A. K., Kasi R., Subramaniam R. Synthesis of nano-TiO2 coating systems for solar cell // Pigment and Resin Technology, 2020. Vol. 49. Is. 1. P. 26–32.
2. Razak A., Irwan Y., Leow W. Z., Irwanto M., Safwati I., Zhafarina M. Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance // International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, 2016. Vol. 6. Is. 5. P. 682.
3. Kim H.-S., Park J. E., Patel M., Kim H., Kim D. S., Byeon S. K., Lim D., Kim J. Optically transparent and electrically conductive NiO window layer for Si solar cells // Materials Letters, 2016. Vol. 174. P. 10–13.
4. Rafiee M., Chandra S., Ahmed H., McCormack S. J. An overview of various configurations of Luminescent Solar Concentrators for photovoltaic applications // Optical Materials, 2019. Vol. 91. P. 212–227.
5. Sark W. Luminescent Solar Concentrators — a low cost photovoltaics alternative // Renewable Energy, 2013. Vol. 49. P. 207–210.
6. Gusev A., Shul'gin V., Braga E., Zamnius E., Kryukova M., Linert W. Luminescent properties of Zn complexes based on tetradentate N2O2-donor pyrazolone schiff bases // Dyes and Pigments, 2020. Vol. 183. P. 108626.

УДК 004.89 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.821.822

# Интеллектуальная система анализа и оценки медицинских изображений для поддержки принятия врачебных решений

## An Intelligent System for Analyzing and Evaluating Medical Images to Support Medical Decision-making

**Бурдин Д. В.**
***младший научный сотрудник***
*daniil-b96@mail.ru*

**Руденко М. А., к. т. н., доцент**
*rudenko.ma@cfuv.ru*

*ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»*
*г. Симферополь*

**Burdin D. V.**
***junior researcher***
*daniil-b96@mail.ru*

**Rudenko M. A., Ph.D, Associate Professor**
*rudenko.ma@cfuv.ru*

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University*
*Simferopol*

В статье представлена разработка системы анализа и оценки медицинских изображений с использованием искусственных нейронных сетей. Созданная система позволяет проводить классификацию изображений для диагностики диабетической микроангиопатии.
**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть; сверточная нейронная сеть; VGG-16; TensorFlow; Keras; Python.

The paper presents the development of a system for analyzing and evaluating medical images using artificial neural networks. The developed system allows the classification of images for the diagnosis of diabetic microangiopathy.
**Keywords:** artificial neural network; convolutional neural network; VGG-16; TensorFlow; Keras; Python.

### *Введение*

Широкое распространение сахарного диабета и прогрессирующее ухудшение здоровья на фоне данного заболевания обосновывают необходимость применения новых технологий для ранней диагностики диабетических микроангиопатий. Совместное применение цифровой капилляроскопии и сверточных нейронных сетей позволит существенно повысить качество и скорость диагностики микрососудистых нарушений.

### *Сверточные нейронные сети*

Сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network — ConvNet/CNN) — это алгоритм глубокого обучения, который способен получать на вход изображение, устанавливать усваиваемые веса и смещения различным областям в изображении

и отличать эти области. Особенностью сети является меньшая предварительная обработка в отличие от других алгоритмов [1]. В основе сверточных нейронных сетей лежат фильтры [2], которые производят распознавание определенных характеристик изображения (прямых линий, геометрических форм). Фильтр — это один или коллекция кернелов (ядер). Кернел представляет собой обычную матрицу чисел, которые являются весовыми коэффициентами. Эти веса корректируются для поиска определенных характеристик на изображении.

***Распознавание и результаты***

Для проектирования сверточной нейронной сети применялась архитектура VGG-16 [3], библиотека TensorFlow с надстройкой Keras [4]. Архитектура сверточной сети состоит из десяти слоев. В качестве функции активации применяется Relu (выпрямленная линейная функция активации). Подготовленная модель обучалась в течение 25 эпох. Обучение за одну эпоху составляет в среднем 2 с. Достигается это за счет обучения на графических ядрах. Обучение на центральном процессоре с такой же конфигурацией занимает в среднем 180с. Разработанная система для анализа и оценки медицинских изображений после обучения позволила проводить классификацию изображений капилляроскопии с точностью 0,84 по двум классам: «контроль» и «патология». Результат работы системы показан на рис. 1.

**Рис. 1.** Результаты работы системы оценки капилляроскопических изображений в норме и при наличии микроангиопатии

***Литература***

1. Scherer D., Muller A., Behnke S. Evaluation of Pooling Operations in Convolutional Architectures for Object Recognition // Lecture Notes in Computer Science, 2010. Vol. 6354. P. 92–101.
2. Boominathan L., Kruthiventi S. S., Babu R. V. CrowdNet: A Deep Convolutional Network for Dense Crowd Counting // Proceedings of the 2016 ACM on Multimedia Conference (Amsterdam, The Netherlands, October 15–19, 2016), 2016. P. 640–644.
3. Illustrated: 10 CNN Architectures [Электронный ресурс]. URL: https://towardsdatascience.com/illustrated-10-cnn-architectures-95d78ace614d#a253 (дата обращения: 27.04.2021).
4. Deep Learning Frameworks Comparison — Tensorflow, PyTorch, Keras, MXNet, The Microsoft Cognitive Toolkit, Caffe, Deeplearning4j, Chainer [Электронный ресурс]. URL: https://www.netguru.com/blog/deep-learning-frameworks-comparison (дата обращения: 28.04.2021).

УДК 621.376.9 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.823.824

# Разработка и апробация методики формирования критической совокупности параметров микросхем

## Development and Approbation of the Method of Forming a Critical Set of Microcircuits Parameters

**Шабанов А. А.**
***инженер***
*shabanov.andr1@yandex.ru*

**Путря М. Г., д. т. н., профессор**
*pmg@miee.ru*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Shabanov A. A.**
***engineer***
*shabanov.andr1@yandex.ru*

**Putrya M. G., Ph.D, professor**
*pmg@miee.ru*

*National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Проведено исследование основных параметров СВЧ-микросхем, влияющих на характеристики радиолокационной аппаратуры, определены и сформулированы базовые и частные параметры микросхем и характеристики радиолокационной аппаратуры, разработана и апробирована методика формирования критической совокупности параметров микросхем.
**Ключевые слова:** электронная компонентная база; радиолокация; радиоэлектронная аппаратура; СВЧ-микроэлектроника.

The paper highlights main parameters of microwave microcircuits affecting the characteristics of radar equipment, as well as basic and specific parameters of microcircuits and the characteristics of radar equipment. Besides, the method of forming a critical set of parameters of microcircuits has been developed and approbated.
**Keywords:** electronic component base; radiolocation; radar equipment; microwave microelectronics.

### *Введение*

Для качественной разработки технических заданий по модернизации аппаратуры или создания ее новых видов за счет использования в ней альтернативной электронной компонентной базы или проектирования новых типов схем необходим системный подход, который позволит сформировать минимально необходимую критическую совокупность параметров как радиолокационной аппаратуры (РЛА), так и используемой в ней ЭКБ, учитывающую все обязательные параметры, на основании которой разработчики аппаратуры смогут провести оценку эффективности взаимозаменяемости микросхем.

Для решения поставленной задачи разработана и апробирована методика формирования критической совокупности параметров микросхем.

***Описание методики***

Для разработки методики формирования критической совокупности параметров микросхем проведены исследования и анализ основных характеристик РЛА и параметров ЭКБ.

Совокупности частных параметров ЭКБ, влияющих на конкретную характеристику РЛА, определяются экспертным путем с учетом известных соотношений и опытных результатов.

Основной особенностью методики формирования критической совокупности параметров ЭКБ является формирование критических совокупностей параметров микросхем на основании расчета весовых коэффициентов, полученных согласно разработанной математической модели.

После проведения расчета весовых коэффициентов частных параметров микросхемы формируются критическая совокупность частных параметров микросхемы и критическая совокупность характеристик аппаратуры, достаточные для оценки влияния параметров микросхемы на характеристики РЛА.

***Апробация методики***

Апробация методики формирования критической совокупности параметров микросхем проводилась на примере платы малошумящего усилителя (далее — МШУ), входящей в состав приемного тракта аналогового радиочастотного блока (АРБ), разработанной НИУ МИЭТ [1], в состав которой входит микросхема HMC996LP4E [2].

***Заключение***

В результате разработана и предложена методика формирования критической совокупности параметров ЭКБ.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90043.***

***Литература***

1. Цветков В. К., Лялин К. С. Проектирование и экспериментальное исследование // Журнал радиоэлектроники, 2013. — № 12. — С. 10–10.
2. Analog devices: [Электронный ресурс]. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/ data-sheets/hmc996.pdf.

***The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90043.***

УДК 621.382.2/.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.825.827

# Радиационно стойкий 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с использованием автокалибровки на базе КНИ 180 нм

## Rad-Hard 12-bit Analog-to-Digital Converter Using Auto-Calibration Based on 180-nm SOI

**Кочетков Д. В.**
***инженер-конструктор 1-й категории[1], аспирант[2]***
*dkochetkov@niime.ru*

**Белоусов Е. О., к. т. н.**
***ведущий инженер-конструктор[1]***
*ebelousov@niime.ru*

**Моленкамп К. М.**
***главный специалист[1]***
*kmolenkamp@niime.ru*

**Эннс А. В., к. т. н.**
***начальник лаборатории[1]***
*aenns@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Kochetkov D. V.**
***Design engineer of the 1st category[1], postgraduate[2]***
*dkochetkov@niime.ru*

**Belousov E. O., Ph.D**
***Lead design engineer[1]***
*ebelousov@niime.ru*

**Molenkamp K. M.**
***Chief Specialist[1]***
*kmolenkamp@niime.ru*

**Enns A. V., Ph.D**
***Head of Laboratory[1]***
*aenns@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Разработан экспериментальный образец 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя с высокими показателями линейности при воздействии

одиночного импульса и накоплении дозы. В качестве приемов для улучшения значений интегральной и дифференциальной нелинейности применялась автокалибровка внутреннего компаратора.
**Ключевые слова:** регистр последовательного приближения; поглощенная доза; интегральная нелинейность; дифференциальная нелинейность.

The paper presents an experimental sample of a 12-bit analog-to-digital converter with high linearity rates under the action of a single pulse and dose accumulation. Self-calibration of the internal comparator has been used as a technique for improving the values of integral and differential nonlinearity.
**Keywords:** successive approximation register; absorbed dose; integral nonlinearity; differential nonlinearity.

### *Введение*

В последнее время цифровые мультимедийные приложения становятся все более и более популярными благодаря расширению своего функционала. Тем не менее все сигналы реального мира аналоговые. Для цифровой обработки таких сигналов применяются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) — устройства, которые производят дискретизацию непрерывных аналоговых сигналов и преобразуют их в цифровые слова [1].

### *Компенсация смещения нуля внутренних блоков*

Одним из распространенных видов АЦП является преобразователь последовательного приближения [2]. Такие аналого-цифровые преобразователи могут быть достаточно высокоразрядными, однако использование в их составе УВХ на операционном усилителе и компаратора накладывает ограничение на точность из-за наличия смещения нуля в этих схемах, особенно при воздействии спецфакторов.

При построении дифференциальных каскадов операционных усилителей и компараторов важно строго соблюдать принципы симметричности. Наличие рассогласованной дифференциальной пары влечет за собой возникновение смещения нуля, что негативно влияет на параметры линейности всего АЦП [2]. Для борьбы с этим эффектом применяется схема автокалибровки [3], которая компенсирует токи в ветвях дифференциального усилителя, что позволяет подавлять смещение нуля до 10 мВ.

### *Влияние радиации на поведение схемы*

Накопление дозы прямо пропорционально влияет на величину смещения нуля. Это связано с разной деградацией сток-затворных характеристик [4], вследствие чего принципы симметричности нарушаются. Расширение диапазона компенсирующих токов в системе автокалибровки помогает улучшить параметры линейности АЦП.

### *Заключение*

Такой подход позволил получить экспериментальный образец, изготовленный с технологическими нормами КНИ 180 нм, с параметрами интегральной и дифференциальной нелинейностей до 2,99 и 2,54 МЗР по модулю соответственно при накопленной дозе в 130 кРад и температуре среды +125 °С.

***Литература***

1. Кобзев Ю. М., Фролов Д. П., Эннс А. В., Эннс В. И., Осокин С. А. Радиационно-стойкий аналого-цифровой КНС БМК К1451БК1У: состав и возможности проектирования // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления, 2010. — № 4. — С. 17–23.
2. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика. — Горячая линия — Телеком, 2005. — 454 с.
3. Белоусов Е. О., Кочетков Д. В., Моленкамп К. М., Эннс А. В. Метод коррекции нелинейности на основе усреднения для параллельного аналого-цифрового преобразователя // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2019. — № 4 (176). — С. 36–44.
4. Baker R. J. CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation, Sahibabad: Nisha Enterprises, 2013. 1044 p.

УДК 621.3.095 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.828.829

# Методика подбора оптимальных параметров оптической модели для различных топологических конфигураций

## Method of Selecting Optical Model Parameters for Different Topological Configurations

**Уткина А. А.**
***младший научный сотрудник[1], студент[2]***
*autkina@niime.ru*

**Харченко Е. Л.**
***инженер-конструктор 2-й категории[1], аспирант[2]***
*ekharchenko@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Utkina A. A.**
***junior researcher[1], student[2]***
*autkina@niime.ru*

**Kharchenko E. L.**
***design engineer[1], postgraduate[2]***
*ekharchenko@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В данной работе представлена методика определения оптимальных параметров оптической модели на примере первого слоя металлизации в технологии КНИ-90.
**Ключевые слова:** источник освещения; оптическая модель; топология; фотолитография.

This work presents a method for determining the optimal optical model parameters. The method is applied to the metal layer in SOI90.
**Keywords:** illumination source; optical model; topology; photolithography.

Дифракционные эффекты вносят свое влияние при производстве ИС, оно увеличивается с уменьшением технологических норм [1, 2]. Технологии повышения разрешающей способности развиваются и позволяют компенсировать эти искажения. Одним из этапов является настройка источника освещения [3]. Создание оптической модели такого источника позволяет получить воздушное изображение того, как будет распространяться свет в плоскости подложки. Меняя параметры источника освещения и учитывая поляризацию света, можно изменить

распределение воздушного изображения, что приведет к изменению проявления топологических элементов на пластине. Для топологии любой конфигурации можно подобрать оптимальный источник, но в работе с реальными проектами необходимо найти компромисс для различных вариантов топологии.

Целью исследования стала разработка методики, позволяющей подобрать оптимальный источник излучения для различных топологических конфигураций, а также определить его для заданной тестовой матрицы. Для определения оптимальной настройки в данной работе рассматривались индивидуальные параметры формы источника (внутренний радиус, внешний радиус, угол наклона) и его тип поляризации. Для этого были поставлены такие задачи, как: генерация тестовой матрицы с учетом минимальных размеров для слоя первого металла в технологии КНИ-90; генерация минимального набора параметров для построения оптической модели выбранного источника излучения; считывание полученных данных, изменение настроек источника; определение параметров, которые дают наилучший результат; более точная настройка параметров; определение наиболее подходящего типа поляризации; проверка источника при разных значениях фокуса.

***Выводы***

В результате данной работы предложена методика определения оптимальных параметров источника излучения. Работа реализована на тестовой матрице в слое первого металла. Итогом настройки является файл, содержащий в себе оптимальные настройки оптической модели, который можно использовать в рамках дальнейшего моделирования.

***Литература***

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники, 2012. — С. 539–563.
2. Красников Г.Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. Москва, 1999. — С. 162–174.
3. Mack C.A. The Science of Microfabrication. — John Wiley & Sons, 2007.

УДК 621.382.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.830.831

# Оценка влияния геометрии области NWELL на характеристики стандартных ячеек

## Impact of Well Edge Proximity Effect on Standard Cell Parameters

**Загидуллина О. Р.**
***инженер-конструктор 2-й категории***[1]
*ozagidullina@niime.ru*

**Коротких С. А.**
***инженер-конструктор 2-й категории***[1]***, студент***[2]
*skorotkikh@niime.ru*

[1] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
[2] *Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Zagidullina O. R.**
***design engineer***[1]
*ozagidullina@niime.ru*

**Korotkikh S. A.**
***design engineer***[1]***, student***[2]
*skorotkikh@niime.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе проведена оценка влияния размеров и формы N-кармана на характеристики стандартной ячейки. Выполнено моделирование и получены зависимости ключевых характеристик стандартной ячейки от геометрии N-кармана.
**Ключевые слова:** LDE; WPE; топология; стандартные ячейки.

This paper studies the impact of the well edge proximity effect on standard cell dynamic parameters. Basic standard cells have been modeled and main cell characteristics in accordance with Nwell different configurations have been obtained.
**Keywords:** LDE; WPE; layout; standard cell.

### *Введение*

Главной тенденцией современной полупроводниковой промышленности является постоянное уменьшение технологических норм [1]. Сокращение размеров приводит к появлению новых эффектов (Layout Dependent Effects) [2].

Цель данного исследования — оценка величины эффекта близости границы N-кармана на характеристики стандартной ячейки (WPE, Well-edge Proximity Effect).

***Эффект близости границы кармана***

Данный эффект заключается в том, что при формировании кармана методом ионной имплантации происходит рассеяние заряженных частиц на краю резистивной маски, в результате чего концентрация примеси на границе кармана увеличивается. Изменение концентрации примеси приводит к изменению величины порогового напряжения транзистора, расположенного близко к границе кармана [3, 4]. В ходе исследования средствами специализированного ПО были сформированы несколько десятков вариантов топологии с разными вариантами исполнения N-кармана, выполнена паразитная экстракция и измерены характеристики: задержка, длительность фронта, потребляемая мощность.

***Выводы***

Авторами проведено исследование влияния конфигурации N-кармана на характеристики стандартной ячейки. Получены зависимости ключевых характеристик ячеек от параметров N-кармана. Определена конфигурация N-кармана, не искажающая параметры транзисторов, получены зависимости характеристик ячейки от варианта исполнения кармана, сформулированы рекомендации по проектированию топологии стандартных ячеек.

***Литература***

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 частях. — Москва, 2004. — Часть 2.
3. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Исследование LDE-эффектов и методов аттестации файлов DRC для субмикронных технологий 90–28 нм // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 619–622.
4. Toshiki Kanamoto et al. Impact of well edge proximity effect on timing // ESSCIRC 2007 — 33rd European Solid-State Circuits Conference, 2007. P. 115–118.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.832.833

# Исследование и анализ разработанных реализаций DET-триггеров

## Research and Analysis of Developed DET-Triggers Implementations

**Горчакова М.А.**
***инженер-конструктор*[1], *аспирант*[2]**
*gorchakova.ma@phystech.edu*

[1] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
[2] *Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Gorchakova M.A.**
***design-engineer*[1], *postgraduate*[2]**
*gorchakova.ma@phystech.edu*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

Разработаны реализации схем DET-триггеров. Проанализированы их параметры, такие как потребляемая мощность на цепях распространения тактового сигнала и сигнала данных, общая потребляемая мощность и задержки. Произведено сравнение этих схем и выявлены недостатки и преимущества каждой из них. Также рассмотрен вопрос реализации DET-триггеров на основе стандартных ячеек БМК.
**Ключевые слова:** DET-триггер; БМК; СБИС.

The paper presents implementations of DET-flip-flop circuits. Power consumption on the clock signal and data signal propagation circuits, total power consumption and delays have analyzed. Also, the issue of implementation of DET-triggers based on standard BMK cells has been considered.
**Keywords:** DET-trigger; ULA; ASIC.

### *Введение*

При проектировании сверхбольших интегральных схем эффективность энергопотребления является важным фактором, который должен быть обязательно учтен разработчиками. С развитием области вычислительных технологий достижение высокой производительности в СБИС при низком уровне потребляемой мощности приобретает все большее значение [1]. Существует множество методов, направленных на снижение энергопотребления, начиная с конструкции транзисторов и заканчивая архитектурами power-gating и clock-gating. Так как в цифровых СБИС наибольшее потребление происходит при переключении триггеров в момент подачи синхросигнала, имеет место метод, основанный на использовании специальных элементов, таких как триггеры, работающие по двум фронтам.

Стандартные триггеры переключаются только по одному фронту тактовой частоты (либо положительному, либо отрицательному), поэтому потребление на другом фронте не является «функциональным», то есть на нем не происходит перезаписи регистров. Для решения данной проблемы используются различные конструкции D-триггеров, работающих по двум фронтам (DET-триггеров). Такой триггер за один период синхросигнала может обработать два значения. Таким образом, можно снизить тактовую частоту в два раза при неизменной скорости передачи данных.

***Сравнительный анализ***

В ходе данной работы был выполнен литературный обзор по теме и выбраны некоторые реализации DETFF. Для сравнения и изучения представленных реализаций их схемы были построены в программе Cadence с использованием транзисторов p-типа с w-finger = 3,56 мкм, l = 180 нм и n-типа с w-finger = 1,9 мкм, l = 180 нм, где w и l — ширина и длина канала соответственно. Далее представлена полученная в результате исследования сравнительная таблица с установленными параметрами разработанных схем (Afgahai, Wang, Static).

**Таблица 1.** Параметры разработанных схем

| | Кол-во транзисторов | Кол-во уровней логики | t(0->1), пс | t(1->0), пс | tr, пс | tf, пс |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Afgahai | 24 | 3 | 462 | 470 | 150 | 200 |
| Wang | 22 | 3 | 460 | 340 | 190 | 137 |
| Static | 32 | 6 | 709 | 690 | 160 | 200 |

***Заключение***

В данном исследовании был рассмотрен один из методов, направленный на снижение потребляемой мощности, а именно использование специальных элементов, таких как DET-триггера. Проанализированы их параметры, такие как потребляемая мощность на цепях распространения тактового сигнала и сигнала данных, общая потребляемая мощность и задержки. Произведено сравнение этих схем и выявлены недостатки и преимущества каждой из них. Также рассмотрен вопрос реализации DET-триггеров на основе стандартных ячеек БМК.

***Литература***

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. — М.: Столичная энциклопедия, 2012. — С. 510–538.
2. Afghahi M., Yuan J. Double-edge-triggered D-flip-flops for high-speed CMOS circuits // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1991. V. 26. № 8. P. 1168–1170.
3. Wang J.S. A new true-single-phase-clocked double-edge-triggered flip-flop for low-power VLSI designs // 1997 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 1997. V. 3. P. 1896–1899.
4. Singh G. et al. LOW POWER DUAL EDGE-TRIGGERED STATIC D FLIP-FLOP // International Journal of VLSI Design & Communication Systems, 2013. V. 4. № 3. P. 23.

УДК 537.86 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.834.835

# Обоснование факта сдвига резонансной частоты объемной короткозамкнутой UHF-метки при контакте с металлом

## Explaining the Shift of the Resonant Frequency of the Volumetric Short-circuited UHF Label in Contact with Metal

**Эпов И. В.**
***инженер[1], студент[2]***
*toniindeath@mail.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Epov I. V.**
***engineer[1], student[2]***
*toniindeath@mail.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе было проведено численное моделирование объемных короткозамкнутых UHF-меток, а также измерение импедансов антенн меток. Результатом работы стало качественное объяснение сдвига резонансной частоты метки при контакте с металлом.
**Ключевые слова:** RFID; UHF; резонансная частота; импеданс.

The paper deals with numerical modeling of volumetric short-circuited UHF tags, as well as measurement of the impedances of the tags antennas. The result of the work is a qualitative explanation of the shift of the resonant frequency of the label in contact with the metal.
**Keywords:** RFID; UHF; resonant frequency; impedance.

### *Введение*

Объемные короткозамкнутые UHF-метки широко применяются для маркировки объектов с металлической поверхностью. Целью данной работы является определение причин сдвига рабочей (резонансной) частоты метки при контакте с металлом.

### *Исследования и результаты*

Согласно [1–3] резонансная частота RFID-метки определяется согласованием импедансов ее микросхемы и антенны. Проведенные с помощью векторного анализатора OBZOR TR 1300/1 измерения показали, что при контакте метки с металлической поверхностью изменяется импеданс антенны, что приводит к сдвигу резонансной частоты метки вправо. Для выявления причин сдвига было проведено

численное моделирование объемной короткозамкнутой UHF-метки в свободном пространстве и при контакте с металлом. Моделирование показало, что изменение импеданса антенны метки при контакте с металлической поверхностью происходит из-за уменьшения волнового сопротивления линии передачи антенны, а также эффективной диэлектрической проницаемости подложки метки, находящейся между ее проводящими электродами.

***Литература***

1. Шарфельд Т. Системы RFID низкой стоимости, 2006.
2. Yeoman M.S., O'Neill M. Impedance Matching of RFID Tag Antenna to Maximize Read Range & Design Optimization.
3. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника: в 3 ч. // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. — Ч. 1. — 2017. — Вып. 1 (165). — С. 59–63; Ч. 2. —2017. — Вып. 4 (168). — С. 16–41; Ч. 3. — 2018. — Вып. 3 (171). — С. 63–93.

УДК 53. 539.3/.6 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.836.837

# Исследование характеристик различных пленок при разных углах поворота в пространстве

## Research on Characteristics of Different Films at Different Angles of Rotation in Space

**Падалинский М. М.**
***студент***
*ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»*
*г. Симферополь*
*miha-padalinskiy2010@mail.com*

**Padalinskiy M. M.**
***student***
*V. I. Vernadsky Crimean Federal University*
*Simferopol*
*miha-padalinskiy2010@mail.com*

В работе приведены результаты исследования сверхтонких пленок алюминия, а также медной и алюминиевой фольги под воздействием СВЧ-излучения при различных углах поворота относительно плоскости волновода.
**Ключевые слова:** СВЧ; сверхтонкие пленки; электромагнитное поле; экранирование.

This work presents the results of a research of ultrathin aluminum films, as well as copper and aluminum foil exposed to microwave radiation at different angles of rotation relative to the plane of the waveguide.
**Keywords:** microwave; ultrathin films; electromagnetic field; shielding.

### *Введение*

В современном мире становится все больше и больше внешних источников электромагнитного поля. И для электроники этот факт является довольно плачевным, ведь ЭМП способно сильно влиять на ее работу: от создания помех и до выведения из строя [1]. Поэтому необходимо исследовать различные материалы и определить оптимальный для экранирования электронного оборудования.

### *Эксперимент*

В качестве образцов были взяты алюминиевая и медная фольга, пленки алюминия на ситалловой подложке толщинами 3, 5, 10 нм. Данные структуры с размерами 15×15, дабы максимально уменьшить воздействия отраженной волны на генератор входной цепи [2], были погружены в волновод с сечением 32×74 мм и облучены СВЧ-волнами частотой 4 ГГц. Важным фактором при этом является то, что их вращали вокруг своей оси. Такой эксперимент позволил получить важные характеристики, зависящие от ориентации пленки: коэффициент ослабления, КСВН, а также отношения мощностей прошедшего и падающего излучения и другие. Далее рассмотрим изменение КСВН (рис. 1) при различных углах поворота.

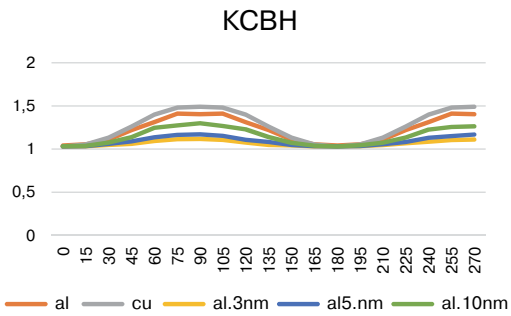



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению от угла поворота

Можно увидеть, когда образцы находятся параллельно распространению излучения (0 градусов на графике), КСВН минимальный. При перпендикулярном расположении пленки коэффициенты значительно выросли, причем максимально отражает медная фольга. Это объясняется высокой проводимостью меди, соответственно, она лучше отражает падающую волну [3].

***Выводы***

Итак, результаты данного эксперимента в дальнейшем можно использовать для подбора оптимальной пленки с хорошими характеристиками в качестве экрана для электронных устройств.

***Литература***

1. Старостенко В. В. и др. Оптические свойства и динамика наноразмерных пленок алюминия // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2018), 2018. — С. 1017–1021.
2. Fitaev I. S. et al. Surface topologies of thin aluminum films and absorbing properties of metal dielectric structures in the microwave range // ITM Web of Conferences. — EDP Sciences, 2019. V. 30. P. 08013.
3. Фомин Н. Е., Ивлев В. И., Юдин В. А. Влияние примесей на электросопротивление меди и алюминия // Инженерные технологии и системы, 2014. — № 1–2.

УДК 681.3.01 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.838.839

# Разработка универсального цифрового тестера на основе ПЛИС

## Developing a Universal Digital Tester Based on FPGA

**Максимов А. К.**
***аспирант[1], инженер-конструктор 1-й категории[2]***
*[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*
*[2] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*amaksimov@niime.ru*

**Maksimov A. K.**
***postgraduate[1], design engineer of the 1st category[2]***
*[1] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*
*[2] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*amaksimov@niime.ru*

Разработан формат описания временных диаграмм, подходящий для работы как с последовательными, так и с параллельными цифровыми интерфейсами. Сформулирована общая концепция построения конфигурации ПЛИС для работы с созданным форматом файлов.
**Ключевые слова:** ПЛИС; формат описания временных диаграмм; цифровые интерфейсы; LabView; DRAM.

A format for describing timing diagrams has been developed, suitable for working with both serial and parallel digital interfaces. The general concept of FPGA construction for working with the developed file format has been formulated.
**Keywords:** FPGA; format for describing timing diagrams; digital interfaces; LabView; DRAM.

### *Введение*

На сегодняшний день одна из проблем тестирования цифровых интегральных схем (ЦИС) заключается в постоянном увеличении количества разнообразных цифровых интерфейсов передачи данных [1]. Сотрудники, задействованные в тестировании новых образцов ЦИС, вынуждены вносить существенные коррективы в имеющиеся средства измерений, программное обеспечение и методики.

Задача оптимизации процессов отладки измерительного оборудования и самого этапа тестирования становится актуальнее с появлением каждого нового типа цифровых интерфейсов. Один из способов оптимизировать процесс отладки оборудования — использование унифицированных описаний цифровых временных диаграмм. К таковым можно отнести языки описания аппаратуры вроде Verilog и VHDL [2], С-подобные: HHDL, Hydra, Lava, или полноразмерные форматы, например «.hws». Тем не менее процесс разработки алгоритмического описания новых временных диаграмм занимает существенную часть времени отладки

оборудования и требует высокой квалификации сотрудников для предупреждения возможных ошибок в описании. Создание узконаправленного формата, оптимизированного под создание цифровых последовательностей, позволило бы решить подобные проблемы.

***Разработка и прототипирование***

В данной статье рассматривается новая структура описания временных диаграмм на основе табличного представления данных. Разработанный формат позволяет создавать цифровые последовательности для микросхем как с последовательными, так и с параллельными интерфейсами передачи данных.

Для прототипирования цифрового тестера на основе разработанного формата используется модуль ПЛИС компании National Instruments при взаимодействии с программным обеспечением (ПО) на графическом языке G в среде LabView [3]. Основная задача ПО состоит в декодировании исходного текстового формата описания временных диаграмм и передаче данных в модуль ПЛИС. Исходные данные для ПЛИС сохраняются в разделах блоков памяти DRAM и содержат таблицу цифровых векторов, списки ссылок для изменяемых частей диаграммы и дополнительные параметры для алгоритмического синтеза цифровых последовательностей.

***Основные результаты исследования***

На основе исходных данных ПЛИС может создавать необходимые тестовые вектора и воспроизводить/принимать и сохранять данные объемом порядка 500 Мбит без дополнительной подзагрузки/выгрузки данных.

Для выходных данных на базе ПЛИС реализуема предварительная обработка цифровых данных [4, 5].

Использование ПЛИС позволяет не только провести апробацию предложенного формата, но и выполнять полноценное исследование реальных образцов цифровых схем с помощью предложенного описания на частотах до 800 МГц.

***Литература***

1. Павлов В. А. Интерфейсы периферийных устройств: Учебное пособие для вузов. — Саров, 2010. — 374 с.
2. Стешенко В. Б., Попова Т. В., Малашевич Д. Б. Основы HDL Verilog как средства проектирования цифровых устройств: Учебное пособие. — Москва: МИЭТ, 2006. — 136с.
3. NI FlexRIO FPGA Module Installation Guide and Specifications [Электронный ресурс] // National Instruments. URL: https://www.ni.com/pdf/manuals/373047b.pdf (дата обращения: 13.04.2021).
4. Нидеккер Л. Г., Шмигельский В. Н., Эннс В. И. Проектирование цифровых схем на основе БМК с использованием стандартных элементов // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 1 (161). — С. 23–25.
5. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. — М.: Горячая линия — Телеком, 2005. — 454 с.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.840.841

# Моделирование постимплантационного отжига нестехиометрического $SiO_{1.7}$

## Simulation of Post-plant Annealing of Nonstoichiometric $SiO_{1.7}$

**Окулич Е. В.**
***м. н. с.*[1]**
*eokulich@nifti.unn.ru*

**Окулич В. И., к. ф.-м. н.**
***доцент*[2]**
*victorokulich@mail.ru*

**Тетельбаум Д. И., д. ф.-м. н., профессор**
***в. н. с.*[1]**
*tetelbaum@hys.unn.ru*

**Михайлов А. Н., к. ф.-м. н.**
***зав. лаб.*[1]**
*mian@nifti.unn.ru*

*[1] Нижегородский государственный университет*
*603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23*
*[2] Нижегородский институт управления — филиал РАНХиГС*
*603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 46*

**Okulich E. V.**
***junior science researcher*[1]**
*eokulich@nifti.unn.ru*

**Okulich V. I., Ph.D**
***associate professor*[2]**
*victorokulich@mail.ru*

**Tetelbaum D. I., Ph.D**
***leading researcher*[1]**
*tetelbaum@hys.unn.ru*

**Mikhaylov A. N., Ph.D**
***head of laboratory*[1]**
*mian@nifti.unn.ru*

*[1] State University of Nizhny Novgorod*
*23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*
*[2] Nizhny Novgorod Institute of Management — branch of RANEPA*
*46 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

С использованием молекулярно-динамического моделирования и данных программы SRIM изучен процесс кластерообразования Si при термическом отжиге облученных ионами $Si^+$ слоев $SiO_{1.7}$.

**Ключевые слова:** оксид кремния; ионная имплантация; молекулярная динамика; мемристор.

The paper considers the process of Si cluster formation during thermal annealing of $SiO_{1.7}$ layers irradiated with Si+ ions using molecular dynamics simulation and data from the SRIM program.
**Keywords:** silicon oxide; ion implantation; molecular dynamics; memristor.

***Введение***

Слои нестехиометрического оксида кремния широко используются для создания мемристоров. Представляется возможность управления их параметрами за счет модификации пленок оксида облучением ионами $Si^+$. В связи с этим проведено моделирование эволюции дефектной структуры облученного слоя оксида.

***Метод реализации***

Моделирование движения атомов при температуре отжига 1500 K проводилось с использованием программы LAMMPS. Основной задачей было создание структуры, насыщенной атомами кремния при облучении ионами с заданной дозой на определенной глубине. В структуру, использовавшуюся в [1], были внедрены дефекты и ионы кремния в соответствии с результатами программы SRIM для следующих параметров: глубина 20 нм аморфного $SiO_{1.7}$, доза $1 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$, энергия внедряемых ионов $Si^+ = 20$ кэВ. Соответствующее число вакансий атомов Si и O создавалось их случайным удалением, а междоузельные атомы — их случайным внедрением при выполнении условия, при котором расстояние между двумя атомами не должно было быть меньше суммы атомных радиусов соответствующих соседей.

Координаты атомов кластеров периодически фиксировались с временным промежутком 5 нс (начиная с 25 нс), общее время расчета ~100 нс. Проводилась оценка структурных характеристик моделированного объема с использованием специально написанного комплекса программ. Это позволило наблюдать эволюцию в процессе отжига числа, взаимного расположения скоплений атомов кремния, размеров кластерных образований и основных структурных единиц аморфного диоксида кремния типа $Si{-}O_4$. Также рассчитывались радиальные функции распределения атомов как отмеченных образований, так и моделируемого объема в целом, а также углы между связями.

***Результаты***

Расчеты показали возникновение устойчивых кластеров Si, содержащих от 7 до 16 атомов, начиная со времени ~65 нс. Именно они могут быть ответственны за образование проводящих путей, обеспечивающих работу мемристора на основе оксида кремния.

***Работа поддержана Правительством Российской Федерации (контракт № 074-02-2018-330 (2)).***

***Литература***

1. Окулич Е. В., Окулич В. И., Тетельбаум Д. И. // ПЖТФ, 2020. — Т. 46. — Вып. 1. — С. 24–27.

***This work was supported by the Government of the Russian Federation (contract № 074-02-2018-330 (2)).***

УДК 537.533.9 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.842.844

# Влияние температуры проявления на шероховатость края экспонируемых линий в HSQ-резисте

## Influence of Development Temperature on Edge Roughness of Exposed Lines in HSQ Resist

**Шишлянников А. В.**
***аспирант[1], научный сотрудник[2]***
*ashishlyannikov@niime.ru*

**Татаринцев А. А., к. ф.-м. н.**
***старший научный сотрудник[3]***
*tatarintsev@ftian.ru*

**Шарапов А. А.**
***аспирант[1], научный сотрудник[2]***
*andrey.sharapov@phystech.edu*

*[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[2] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[3] ФТИАН им. К. А. Валиева РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*

**Shishlyannikov A. V.**
***postgraduate[1], researcher[2]***
*ashishlyannikov@niime.ru*

**Tatarintsev A. A., Ph.D**
***senior researher[3]***
*tatarintsev@ftian.ru*

**Sharapov A. A.**
***postgraduate[1], researcher[2]***
*andrey.sharapov@phystech.edu*

*[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*[2] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[3] Valiev IPT RAS*
*36/1 Nakhimovskii Ave., Moscow, 117218*

В работе проведено исследование влияния температуры проявления на шероховатость края экспонируемых линий в резисте HSQ.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая литография; негативный электронный резист HSQ; шероховатость края линии; температура проявления.

The paper highlights the influence of the development temperature on the roughness of the edge of the exposed lines in the HSQ resist.
**Keywords:** electron beam lithography; negative electronic resist HSQ; line edge roughness; development temperature.

***Введение***

Одним из важных параметров, влияющих на минимальный размер, качество, а также плотность структур, реализуемых в процессе электронно-лучевой литографии, является шероховатость края линии (LER — line edge roughness). Основным инструментом минимизации шероховатости края линии в полупроводниковой промышленности на данный момент является постлитографическая обработка структур в плазме. В работе [1] исследовалось воздействие различной плазмы (HBr, He, H2, Ar) в целях выявления оптимального соотношения между минимизацией шероховатости края линии и улучшением стойкости структур к травлению.

***Основная часть***

В данной работе проводилось исследование по влиянию температуры проявления на шероховатость края линии в HSQ-резисте, тем самым не потребовалась дополнительная обработка структур в плазме. Экспонировались spl-линии (single pixel line) с разными дозой (от 5000 до 20000 пКл/см) и плотностью упаковки (первоначальным расстоянием между линиями): 200, 100, 80, 60, 50, 40 нм. После экспонирования образцы проявлялись в водном растворе 1 % NaOH и 4 % NaCl при разных температурах: 23, 7, 0, −5 °C. Время проявления составляло 4 мин для 23 °C и 10 мин для 7, 0 и −5 °C. Оценка шероховатости проэкспонированных линий осуществлялась с использованием программного обеспечения LER&LWR Calculator [2, 3]. Для каждой из групп линий с различной плотностью упаковки были подсчитаны значения шероховатости края при фиксированных дозе облучения и температуре проявления. На основе полученных данных были построены трехмерные карты зависимости шероховатости края линии от дозы экспонирования и температуры проявления.

***Выводы***

С понижением температуры проявления происходит уменьшение ширины экспонированных линий в резисте HSQ, что наблюдалось вне зависимости от плотности упаковки линий. Также наблюдается немонотонная зависимость шероховатости края от дозы облучения. Подсчитано, что наиболее низкое значение шероховатости края экспонируемой линии наблюдается при проявлении при −5 °C, а также можно заключить, что проявление при пониженных температурах позволяет существенно снизить шероховатость края линии, не прибегая к дополнительной обработке резиста в различной плазме.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 19-37-90083.***

***Литература***

1. Azarnouche L., Pargon E., Fouchier M., Menguelti K., Luere O., Joubert O., David T., Gouraud P., Verove C. Impact of plasma treatments on etch resistance and LWR of 193 nm photoresist // October 18, 2010 AVS 57th International Symposium Albuquerque, USA.

2. Шарапов А. А., Баранов Г. В. Сравнительный анализ методик оценки количественных характеристик шероховатости наноразмерных структур // Труды Московского физико-технического института, 2018. — Т. 10. — № 2 (38).
3. Свидетельство 2020663814. Инструмент оценки неровностей краев наноструктур по их снимкам, полученным с помощью растрового электронного микроскопа (LER&LWR Calculator): программа для ЭВМ / Шарапов А. А., Баранов Г. В. (RU); правообладатель АО «НИИМЭ». № 2020663106; заявл. 28.10.20; опубл. 02.11.2020, бюл. № 11. 87,9 КБ.

***The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90083.***

УДК 621.382.2.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.845.846

# Исследование и оптимизация логического элемента для ПЛИС, разработанного по технологии 90 нм

## Research and Optimization of the Logical Element for FPGA Developed by 90 nm Technology

**Макиевский Ю. А.**
***инженер-конструктор[1], студент[2]***
*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*ymakievskiy@niime.ru*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Makiyevsky Y. A.**
***design-engineer[1], student[2]***
*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*ymakievskiy@niime.ru*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

Выполнена разработка электронной принципиальной схемы, а также топология логического элемента (LE). Выбраны варианты схемы и топологии с наиболее оптимальными параметрами. Произведена оптимизация топологии для достижения наименьших размеров. Выполнены все необходимые проверки конечной топологии.
**Ключевые слова:** ПЛИС; топология.

The paper presents the development of an electronic concept, as well as the topology of the logical element (LE). The options for the scheme and topology with the most optimal parameters have been selected. A topology has been optimized to achieve the smallest dimensions. All necessary checks of the final topology have been performed.
**Keywords:** FPGA; layout.

### *Введение*

Основной ресурс ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) — это логические элементы, представляющие собой базовый блок, в котором может быть выполнена простая логическая функция или реализовано хранение результата вычисления в регистрах (триггерах). Они объединяются в логические блоки LAB (Logic array blocks), из которых производится сборка конечного изделия [1].

### *Актуальность*

Микросхема может содержать порядка 1500 LAB, состоящих из 10–16 логических элементов. Финальный размер одного такого LE может существенно повлиять на LAB за счет правильно спроектированной топологии, которая в конечном итоге сможет снизить занимаемую площадь одного кристалла. Это означает, что даже

небольшой выигрыш по площади в одном логическом элементе приводит к существенному выигрышу по площади кристалла [2].

Выбор структуры конфигурируемого логического блока производителем ПЛИС — это всегда поиск компромисса по площади кристалла, быстродействию и энергопотреблению [3].

***Выводы***

В рамках данной работы при создании базовой логической ячейки решались две ключевые задачи, а именно: синтезируемые устройства должны обладать максимальным быстродействием, а также размеры блока логического элемента должны быть минимальными.

Для разработки схемы и топологии была использована САПР (система автоматизированного проектирования) Cadance и создана библиотека стандартных ячеек, состоящая из инверторов, буферов и мультиплексоров на транзисторах H-типа и A-типа. Для проведения проверок результата была использована САПР Calibre.

Для оптимизации топологии стоки и истоки разных транзисторов, на которые приходил один и тот же сигнал, объединялись в один, что не влияло на скорость сигнала, но позволяло уменьшить габариты ячейки.

Для оптимизации было рассмотрено несколько вариантов схемотехники и топологии, до тех пор пока не был найден оптимальный вариант, который бы удовлетворял следующим условиям: минимальный размер топологии логического элемента, отсутствие большого количества паразитных емкостей, отсутствие ошибок по DRC и LVS.

***Литература***

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. — М.: Столичная энциклопедия, 2012. — С. 510–538.
2. Бондарь Б.Г. Основы микроэлектроники. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. — 309 с.
3. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: Учебное пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 518 с.

УДК 621.3.049.774.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.847.848

# Разработка СВЧ-компаратора с защелкой на выходе в технологическом базисе БИКМОП

## Developing a Microwave Comparator with a Latch at the Output in the BICMOS Technological Basis

**Качура С. А.**
***инженер-конструктор 2-й категории***
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*skachura@niime.ru*

**Kachura S. A.**
***design engineer of the 2nd category***
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*skachura@niime.ru*

В данной работе исследован и разработан компаратор, который работает на частоте выше 10 ГГц. Разрядность компаратора позволяет создать 8-разрядный АЦП, так как полученное напряжение смещения равно 3 мВ. Передача осуществляется с помощью интерфейса LVDS. Данный компаратор корректно работает при технологическом разбросе PVT: typical, fast, в диапазоне температур от −60 до 125 градусов. Напряжение питания равно 3,3 В с разбросом ±10 %. Компаратор имеет ряд преимуществ по сравнению с высокочастотным компаратором Analog Devices HMC674LC3C.
**Ключевые слова:** АЦП; КМОП; компаратор; АЧХ; ФЧХ.

The paper highlights a comparator, which operates at a frequency above 10 GHz. The capacity of the comparator allows you to create an 8-bit ADC, since the resulting offset voltage is 3mV. The transmission is carried out using the LVDS interface. This comparator works correctly with the PVT technological spread: typical, fast, in the temperature range from −60 to 125 degrees. The supply voltage is 3.3 volts, with a spread of ±10 %. The comparator has several advantages over the Analog Devices HMC674LC3C high frequency comparator.
**Keywords:** ADC; CMOS; comparator; frequency response; phase response.

### *Введение*

Одним из базовых строительных блоков современных АЦП является компаратор. Компаратор — это устройство сравнения аналоговых сигналов, используемое для выполнения функции сравнения двух входных сигналов между собой или одного входного сигнала с определенным опорным сигналом. При этом на выходе определены два значения выходного сигнала, которые могут быть КМОП-сигналами или другими доступными интерфейсами. В последние годы высокоскоростные и малопотребляемые аналоговые цифровые преобразователи широко применяются в схемах цифровых сигнальных процессоров и системах связи новых

поколений. В качестве основного элемента таких АЦП используется компаратор, который определяет производительность всей системы построения АЦП.

Технология SiGe [1] имеет высокую частоту среза, поэтому у нее есть большое преимущество по скорости в сравнении с технологией КМОП. В данной статье рассматривается разработка высокоскоростного компаратора, сделанного на технологии кремний-германий, с использованием биполярных транзисторов, которые предназначены для сверхскоростных и высокочастотных интегральных схем. Тем не менее у этой технологии есть свои недостатки в связи с большой потребляемой мощностью и большой площадью кристалла [1].

***Описание работы компаратора***

Компаратор состоит из предварительного усилителя, регенеративной защелки и выходного буфера [2]. Чтобы оценить усиление предварительного усилителя, используется амплитудно-частотная характеристика. Стоит отметить, что фаза в данном усилителе не имеет никакого физического значения для системы, так как условие генерации в компараторе невозможно [3]. Выход предварительного усилителя соединяется с регенеративной защелкой [2] для сохранения номинала сигнала и добавления еще большего усиления в схему. Разница между логическими уровнями формируется с учетом спецификации интерфейса LVDS.

***Литература***

1. Chan C. H. et al. A 7.8-mW 5-b 5-GS/s dual-edges-triggered time-based flash ADC // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2017. V. 64. № 8. P. 1966–1976.
2. Shibata H. et al. 16.2 A 9GS/s 1GHz-BW oversampled continuous-time pipeline ADC achieving — 161 dBFS/Hz NSD // 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). IEEE, 2017. P. 278–279.
3. Антюфриева Л. А., Михеев Р. С. Защита входов КМОП-компараторов параллельного АЦП от эффекта обратного прохождения сигнала // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника, 2015. — Ч. 1. — Вып. 2 (158). — С. 122–126.

УДК 621.317.799 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.849.850

# Разработка установки для измерения профилей примесей в полупроводниках методом двухзондового измерения сопротивления растекания

## Developing Two-probe Spreading Resistance Profiler for Measuring Doping in Semiconductors

**Краснов А. В.**
***инженер***
*arseny@fidtech.ru*

**Ефанов М. В.**
***ведущий инженер***
*mike@fidtech.ru*

**Оленников Ф. Е.**
***инженер***
*olennikov@fidtech.ru*

*АО «ПК «ФИД-Техника»*
*г. Санкт-Петербург*

**Krasnov A. V.**
***engineer***
*arseny@fidtech.ru*

**Efanov M. V.**
***chief engineer***
*mike@fidtech.ru*

**Olennikov F. E.**
***engineer***
*olennikov@fidtech.ru*

*"Industrial complex «FID-Technology" JSC*
*St. Petersburg*

В работе описан экспериментальный образец установки для измерения профилей примесей в полупроводниках, приведен метод измерения сопротивления растекания с использованием двух зондов.
**Ключевые слова:** сопротивление растекания; профили легирования.

The paper presents experimental spreading resistance profiler used for measuring doping in semiconductors, as well as offers two-probe spreading resistance measurement method.
**Keywords:** spreading resistance; doping profile.

### *Введение*

Измерение профилей примесей в полупроводниках используется при производстве электронных приборов и позволяет контролировать технологические процессы [1]. Целью данной работы является разработка аппаратного комплекса и программного обеспечения для измерения профилей легирования.

***Измерение сопротивления растекания***

Для определения профиля распределения примесей в материале используется измерение сопротивления растекания зондовым методом [2]. Исходя из величины сопротивления между зондами, можно оценить концентрацию примесей. Для этого построения профилей по глубине измерения проводятся на косом шлифе.

***Экспериментальный образец установки***

Была разработана и изготовлена установка измерения сопротивления растекания. Устройство содержит координатный стол, на который устанавливается образец, два зонда с механизмом опускания, контрольный и измерительный блоки, видеокамеру и персональный компьютер. Настройка положения образца и зондов осуществляется с помощью видеокамеры, основной процесс измерения профиля автоматизирован и не требует действий оператора.

***Результаты измерений***

Разработанная установка позволяет измерять профили примесей с разрешением до 1 мкм по глубине. Многократное измерение в каждой точке образца с изменением параметров и использование корреляционных методов обработки данных позволили существенно повысить повторяемость измерений.

Пример измеренного профиля показан на рис. 1.

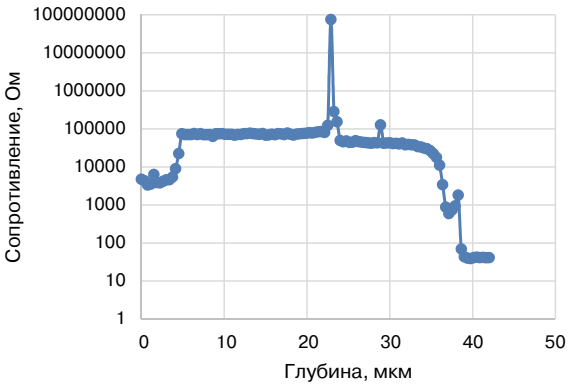



**Рис. 1.** Измеренный профиль сопротивления растекания в эпитаксиальной структуре с p-n-переходом

***Литература***

1. Кобелева С. П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2007. — Т. 73. — № 1. — С. 60–67.
2. ASTM F-672. Test Method for Measuring Resistivity Profiles Perpendicular to the Surface of a Silicon Wafer Using a Spreading Resistance Probe. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.

УДК 535.417 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.851.853

# Связь спектра отражения дифракционной решетки с профилем возбуждаемой моды в волноводе структуры «кремний на изоляторе»

## Relation Between Diffraction Grating Reflection Spectrum and Excited Mode Profile in Silicon-on-Insulator Waveguide

**Миннуллин Р. Т.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*ramil.minnullin@phystech.edu*

**Барабаненков М. Ю., д. ф.-м. н.**
***главный специалист[1], главный научный сотрудник[3]***
*barab@iptm.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*[3] ИПТМ РАН*
*142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*

**Minnullin R. T.**
***researcher[1], postgraduate[2]***
*ramil.minnullin@phystech.edu*

**Barabanenkov M. Y., Sc.D**
***leading specialist[1], leading researcher[3]***
*barab@iptm.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*[3] MIT RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432*

В работе рассматривается дифракционная решетка из материала с изменяемым фазовым состоянием ($Ge_2Sb_2Te_5$, GST) на волноводе структуры «кремний на изоляторе» (КНИ) с дополнительным травлением кремния. Приводятся зависимости спектров отражения структуры от глубины дополнительного травления кремния, а также поперечные профили распределения поля возбуждаемой в волноводе моды. Показана связь коэффициентов отражения первого углового порядка спектра с высотой профиля моды.

**Ключевые слова:** нанофотоника; интегральная фотоника; дифракционная решетка; волновод; угловой спектр; кремний на изоляторе; материалы с изменяемой фазой; GST.

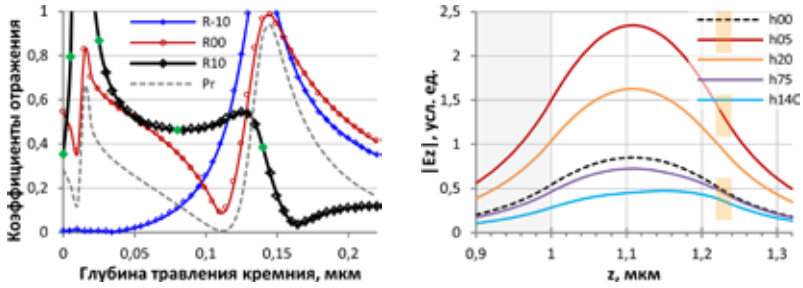
The paper considers a diffraction grating of phase-change material ($Ge_2Sb_2Te_5$, GST) on a silicon-on-insulator waveguide with additional silicon etching. In addition, it presents reflection spectra dependencies of additional silicon etching depth, as well as transverse electric field profiles of the excited in the waveguide mode. Relation between the first angular order reflection coefficient and the mode profile height has been demonstrated.
**Keywords:** nanophotonics; integrated photonics; diffraction grating; waveguide; angular spectrum; silicon-on-insulator; phase-change materials; GST.

***Введение***

Интенсивные исследования ведутся сейчас в области интегральной нанофотоники, в т. ч. на кремниевой платформе, появившейся в качестве альтернативы современной микро- и наноэлектронике, достигающей определенных границ развития за счет масштабирования стандартной планарной технологии [1]. Нанофотоника обладает выдающимися возможностями для разработки высокопроизводительных устройств для систем передачи информации, оптических вычислений, квантовой криптографии, а также некоторых медицинских приложений [2]. В последние десятилетия значительно возрос интерес к нейроморфным архитектурам и многоуровневой энергонезависимой памяти, реализуемым с применением материалов с изменяемой фазой, таких как, например, халькогенидные сплавы типа GST (Ge-Sb-Te) [3, 4].

***Результаты***

В работе рассматривается дифракционная решетка из GST, расположенная на поверхности волновода КНИ-структуры, с дополнительным травлением слоя кремния. Исследование распространения света в данной структуре производилось с помощью метода матричного уравнения Риккати и строгого анализа связанных волн (rigorous coupled wave analysis, RCWA). Зависимости угловых спектров отражения от глубины дополнительного травления кремния сопоставлялись с профилями поперечного распределения поля, возбуждающего волноводную моду. Была выявлена прямая взаимосвязь коэффициентов отражения первого углового порядка с высотой профиля возбуждаемой моды (рис. 1), что демонстрирует возможность использования угловых спектров отражения для исследования подобных периодических структур.




*а* *б*

**Рис. 1.** Зависимости коэффициентов отражения угловых порядков (−1, 0, 1) и полного отражения по мощности ($P_r$) от глубины травления кремния (слева); профили возбуждаемой моды в волноводе (справа), пунктирная линия — профиль моды с решеткой из GST без травления кремния

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-03040.***

***Литература***

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
2. Cheben P., Halir R., Schmid J. H. et al. Subwavelength integrated photonics // Nature, 2018. V. 560. P. 565–572.
3. Brückerhoff-Plückelmann F., Feldmann J., Wright C. D. et al. Chalcogenide phase-change devices for neuromorphic photonic computing // J. Appl. Phys., 2021. V. 129. P. 151103.
4. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4. — С. 60–64.

***This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project № 19-29-03040.***

УДК 004.312 + 621.3.087.92 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.854.855

# Разработка агента функциональной верификации для схемы управления и доступа к АЦП последовательного приближения

## Developing a Functional Verification Agent for the SAR ADC Controller Unit

**Страхов А. С.**
***инженер-конструктор 3-й категории[1], магистрант[2]***
*astrakhov@niime.ru*

**Васильев Е. С.**
***начальник лаборатории[1]***
*evasilev@niime.ru*

**Солнцев М. М.**
***инженер-конструктор 2-й категории[1]***
*msolntsev@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Strakhov A. S.**
***junior verification engineer of IC Design Department[1], master student[2]***
*asrakhov@niime.ru*

**Vasilev E. S.**
***head of laboratory[1]***
*evasilev@niime.ru*

**Solntsev M. M.**
***middle digital designer[1]***
*msolntsev@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

Описаны структурная схема верификационного окружения и разработанный агент функциональной верификации, проверяющий работу схемы управления и доступа к АЦП последовательного приближения. Показано, что предлагаемые решения для контроллера АЦП позволяют обеспечить полное функциональное покрытие и высокую эффективность верификации.
**Ключевые слова:** цифровой СФ-блок; аналого-цифровой преобразователь; АЦП; функциональная верификация; UVM; SVA; кодовое покрытие; тестовое окружение; агент верификации.

The solution has been proposed and described for the block design of verification environment and verification agent for Successive Approximation Register (SAR) ADC controller unit. It has been shown that proposed verification solutions provide full functional coverage and high verification efficiency.

**Keywords:** digital IP; analog-digital converter; ADC; functional verification; UVM; SVA; code coverage; verification environment; verification agent.

***Введение***

В составе подавляющего большинства современных микроконтроллеров присутствует аналого-цифровой преобразователь (АЦП). С развитием технологий микроэлектроники [1, 2] благодаря своей дешевизне и простоте в обращении микроконтроллеры со встроенными схемами АЦП могут использоваться в устройствах, в которых важна быстрая обработка аналоговых сигналов. Для расширения функциональности АЦП в составе микроконтроллера обычно используют схемы управления и доступа (также называемые контроллерами АЦП), которые способны сохранять и обрабатывать результаты преобразования. Схемы контроллеров АЦП достаточно сложны из-за широкого набора выполняемых функций, что делает задачу верификации данных устройств нетривиальной. В открытых источниках описаны лишь общие подходы к верификации с применением методологии UVM [3], но не показано, как эффективно применять данную методологию при верификации контроллера АЦП.

***Разработка структурной схемы верификационного окружения и агента верификации для схемы управления и доступа к АЦП***

При выполнении верификации контроллера АЦП должны выполняться стандартные этапы: создание плана тестирования, написание верификационных тестов, оценка функционального покрытия и покрытия кода. В качестве решения, позволяющего упростить и обеспечить высокую эффективность верификации, предлагается использование поведенческих блоков, которые генерируют эквивалентные реальным сигналы, и создание агента верификации, способного автоматически выявлять несоответствие между сигналами с тестируемого устройства и сигналами, ожидаемыми с поведенческих блоков. В работе рассмотрены структурная схема верификационного окружения, разработанный агент верификации, его основные компоненты, а также используемые методы проверки выходных сигналов при помощи конструкций языка описания аппаратуры SystemVerilog [4, 5].

***Выводы***

Предлагаемое решение было применено при верификации контроллера АЦП для серии промышленных микроконтроллеров, разрабатываемых АО «НИИМЭ». Созданный блок контроллера АЦП в процессе верификации был приведен в соответствие техническому заданию. Было подтверждено полное функциональное и кодовое покрытие спроектированного блока.

***Литература***

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. В 2 томах. — М., 2012.
3. Ashok B. Mehta: ASIC/SoC Functional Design Verification. Springler, Cham., 2018.
4. Spear C.: SystemVerilog for Verification. Springler, Cham., 2006.
5. Томас Д. Логическое проектирование и верификация систем на SystemVerilog. — ДМК Пресс, 2019.

УДК 621.3.049.774 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.856.859

# Доверенное проектирование интегральных схем

## Trusted VLSI Design

**Певцов Е. Ф., к. т. н.**
***директор Центра проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем***
*pevtsov@mirea.ru*

**Деменкова Т. А., к. т. н.**
***доцент***
*demenkova@mirea.ru*

*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

**Pevtsov E. P., Ph.D**
***Director of the Center for the Design of Integrated Circuits, Nanoelectronics and Microsystems***
*pevtsov@mirea.ru*

**Demenkova T. A., Ph.D, Associate Professor**
*demenkova@mirea.ru*

*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

На основе анализа публикаций по тематике аппаратных троянов сформулированы предложения для доверенного проектирования СБИС, обеспечивающих выявление и устранение вредоносных изменений в проектных решениях и реализующих нарушения функциональности интегральных схем и устройств на их основе.
**Ключевые слова:** аппаратные закладки/трояны; проектирование ИС для обеспечения безопасности; доверенное проектирование ИС.

Based on the analysis of publications on the subject of hardware Trojans, proposals have been formulated for the trusted design of VLSI, which ensures the identification and elimination of malicious changes in design solutions and implements violations of the functionality of integrated circuits and devices based on them.
**Keywords:** Hardware Trojans; IC design for security; trusted IP design; Design for Trust; Design for Security.

### *Введение*

Преднамеренные и вредоносные модификации интегральных схем, предназначенные для изменения поведения схемы для достижения определенной цели, называются аппаратными троянами (hardware trojans) [1]. Троянские атаки могут быть реализованы путем изменения технологии (например заменой типа легирования), внедрением аналоговых и цифровых компонентов (например включения посторонней цепи при зарядке паразитного конденсатора или добавления функций конечного автомата, срабатывающих из незадействованных состояний). Тенденции последних лет включают в себя более продвинутые функции, такие

как активация от температуры, а также по радиоканалу и питанию, считывание информации по оптическим боковым каналам, ускоренное старение микросхем и «отказ в обслуживании» (DoS).

Согласно установившейся в настоящее время классификации аппаратные трояны принято различать по фазам внедрения, уровням абстракции, способам активации, воздействующим эффектам и местоположению. Такая классификация предполагает, что каждая из перечисленных категорий содержит несколько атрибутов и основана на том, что классификация должна охватывать все трояны и описывать все способы их вредоносного действия.

Классификация *по способу внедрения* описывает этапы маршрута проектирования, на которых проект уязвим для вредоносных модификаций.

Классификация *по уровню абстракции* описывает различные этапы разработки ИС, включая внедрение IP до его изготовления. Этот уровень охватывает как проектирование топологии (т.е. на физическом уровне), так и определение списка соединений и протоколов связи, используемых в ИС (т.е. на системном уровне).

*Способ активации* описывает средства, с помощью которых запускается недекларированная функция. Сюда относятся постоянно действующие закладки, а также трояны, требующие определенных триггеров для их активации, таких как внутренние последовательные счетчики или внешние триггеры из потоков входных данных.

Категория *реализуемых эффектов* описывает нежелательный результат вредоносного изменения, который может проявляться в виде некоторого изменения функциональности или даже полного отказа микросхемы.

Категория *местоположения* описывает, где внутри микросхемы или оборудования физически может быть реализовано изменение оригинального проекта. При этом объектом атаки может быть как один компонент, например системные часы с внедрением ошибок тактирования, так и несколько сложных компонентов, например процессоров для изменения порядка выполнения команд.

Веб-сайт https://www.trust-hub.org регулярно обновляет коллекцию аппаратных троянских тестов, которые были разработаны и обновлены исследователями в сообществе аппаратной безопасности и доверенного проектирования.

Поскольку все современные разработки отечественных СБИС выполнены с той или иной степенью участия зарубежных компаний, обязательным условием обеспечения надежной эксплуатации этих изделий являются разработка и реализация специальных организационных и технических мероприятий по анализу, выявлению и устранению возможных искажений проектов в виде программных и/или аппаратных закладок непосредственно на этапах проектирования или изготовления.

***Методы доверенного проектирования ИС***

Очевидным условием доверенного проектирования (DfT, Design for Trust или DfS, Design for Security) ИС является предварительный анализ возможных моделей троянских атак и выработка соответствующих мер обнаружения и/или предотвращения [2, 3].

Такими мерами, в частности, являются [4]:

- анализ применяемых в проекте библиотек стандартных элементов с полным раскрытием их спецификации, т.е. описания на уровне топологии, схемы цепей и методик проверки правил проектирования и верификации;

- применение доверенных сложно-функциональных блоков, контроль маршрута проектирования, внесение в топологию проектируемой схемы узлов, реализующих функции запутывания, маскировки, заполнения свободных участков топологии. Запутывание — это метод сокрытия функциональности схемы путем вставки в конструкцию дополнительной схемы логической блокировки, предназначенный для того, чтобы скрыть выполняемые функции и предполагаемую топологию. Маскировка основана на включении в топологию неразличимых по компоновке вентилей с использованием дополнительных фиктивных контактов и поддельных соединений между слоями, что предотвращает возможность для злоумышленника перепроектировать список соединений схемы. При заполнении свободных участков топологии в проект специально добавляют дополнительные функциональные элементы, формирующие комбинационную логику, которая может быть протестирована в процессе проектирования и сбой в функционировании которой служит свидетельством нарушения топологии при изготовлении;
- реализация методологии раздельного производства, при котором на фабрике с нормами проектирования 40–7 нм изготавливается основная часть схемы без раскрытия ее функций, а финальный этап изготовления ИС выполняется на доверенной фабрике;
- создание узлов СБИС на новых принципах цифровой электроники, в частности на основе квантовых эффектов и микроэлектромеханических узлов;
- разработка методик специальных аппаратных измерений анализа их результатов для контроля функционирования изготовленных схем и их параметров.

***Выводы***

Для борьбы с угрозой аппаратных троянов необходимо сформировать точные модели атак, разработать и реализовать соответствующие методы обнаружения и предотвращения. Это является особенно актуальным для отечественных дизайн-центров проектирования и технологических возможностей предприятий радиоэлектронного комплекса, реализующих выполнение «Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 г.» [5]. Результаты данной работы используются при выполнении договорных и поисковых работ и при подготовке высококвалифицированных кадров по профильным специальностям РТУ МИРЭА.

***Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № FSFZ-0706-2020-0022).***

***Литература***

1. Bhunia S., Tehranipoor M. M. (eds.), The Hardware Trojan War. Springer International Publishing AG 2018. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68511-3_2.
2. Miodrag Potkonjak Synthesis of trustable ICs using untrusted CAD tools DAC ’10 // Proceedings of the 47th Design Automation ConferenceJune 2010 Pages 633–634. URL: https://doi.org/10.1145/1837274.1837435.

3. Shi Q., Xiao K., Forte D., Tehranipoor M. Securing split manufactured ICs with wire lifting obfuscated built-in self-authentication // 2017 ACM 27th Great Lakes Symposium on VLSI (GLSVLSI), May 2017. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3060403.3060588.
4. Pevtsov E. Ph., Demenkova T. A., Shnyakin A. A. Design for testability of integrated-circuits and project protection difficulties // Российский технологический журнал, 2019. V. 7. № 4. P. 60–70. URL: https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-60-70.
5. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. URL: http://static.government.ru/media/files/1QkfNDghANiBUNBbXaFBM69Jxd48ePeY.pdf (дата обращения: 10.12.2020).

***This work was supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project № FSFZ-0706-2020-0022).***

УДК 621.396.96 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.860.861

# Реализация радиолокационной системы зондирования поверхностей на ПЛИС

## FPGA Implementation of Radar Surface Observartion System

**Зинис К. А.**
***ведущий инженер***
*k_zin@rambler.ru*

**Варламов Е. В.**
***студент бакалавриата***
*callofkilling456@gmail.com*

*МИРЭА — Российский технологический университет*
*119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

**Zinis K. A.**
***lead engineer***
*k_zin@rambler.ru*

**Varlamov E. V.**
***undergraduate student***
*callofkilling456@gmail.com*

*MIREA — Russian Technological University*
*78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

В работе приведена методика обработки радиолокационных сигналов для получения изображений поверхностей с помощью антенны с синтезированной апертурой. Также рассмотрен пример применения схем программируемой логики для обработки радиолокационных сигналов системы с АФАР и визуализации изображений поверхности.
**Ключевые слова:** ПЛИС; БПФ; радиолокатор; синтезированная апертура; радиолокационное изображение; ЦОС.

The paper presents a technique for processing radar signals to obtain images, using a synthetic aperture antenna.
**Keywords:** FPGA; FFT; radar; synthetic aperture; radar image; DSP.

### *Введение*

Одной из перспективных областей электроники является получение изображений с помощью радиолокации. Такие изображения, в отличие от фотоснимков, обладают большей помехоустойчивостью и несут в себе информацию о рельефе рассматриваемой поверхности, ее динамике и диэлектрических свойствах. Эти преимущества делают радиолокационное зондирование незаменимым средством исследования в океанологии, топографии, картографии и радиолокационной астрономии.

### *Обработка радиолокационных сигналов*

В данной работе используется радиолокационная станция с синтезированной апертурой антенны, которая, в отличие от традиционных АФАР, позволяет получить детализированное изображение с высоким разрешением без увеличения размеров самой станции.

Для обработки радиосигналов используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), преобразующая полученные аналоговые радиосигналы с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Применение ПЛИС имеет преимущества перед применением программируемого контроллера или процессора с фиксированным набором инструкций, поскольку реализует сложную обработку данных аппаратно, что существенно сокращает время выполнения преобразования. Также ПЛИС обладает преимуществами в реализации алгоритма БПФ перед другими аппаратными платформами, такими как ASIC и DSP.

***Методика обработки сигнала на ПЛИС***

Приводится пример реализации алгоритма обработки сигналов, принятых радиолокационной станцией с синтезированной апертурой (РСА), для формирования на их основе изображения поверхности. Исходные данные для расчета:

- количество зондирующих импульсов, соответствующее числу строк в массиве исходных данных;
- количество отсчетов (точек) в отраженном сигнале;
- количество отсчетов в зондирующем импульсе.

Исходя из этих данных рассчитаны параметры, характеризующие размеры изображения и массив входных данных. После этого по алгоритму БПФ определена опорная функция, представляющая собой модель излучаемого сигнала. На следующих этапах путем применения операций свертки опорной функции с отраженным сигналом, а также прямого и обратного быстрого преобразования Фурье рассчитаны распределения откликов в продольном и поперечном направлении и выполнено их суммирование по модулю. В результате получена двумерная матрица распределения амплитуд, являющаяся отображением зондируемой радиолокационным сигналом поверхности.

***Выводы***

Разработан код программы, реализующей обработку радиолокационных сигналов систем с синтезированной апертурой, позволяющий формировать изображение зондируемой поверхности и предназначенный для имплементации на ПЛИС. Также выполнено тестирование программы при формировании изображения на конкретном примере типового сигнала движущейся РЛС с линейно-частотной модуляцией на частоте 9,55 ГГц с девиацией 60 МГц.

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFZ-0706-2020-0022).***

***Литература***

1. Верба В. С., Гаврилов К. Ю., Ильчук А. Р., Татарский Б. Г., Филатов А. А. Радиолокация для всех / Под. ред. В. С. Вербы. — М.: Техносфера, 2020. — 504 с.
2. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. — М.: Радиотехника, 2010. — 682 с.
3. Айфичер Эммануил С., Джервис Барри У. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. — М.: Вильямс, 2018.
4. Virtex-6 // XILINX [Электронный ресурс].URL: http://fpga.su/virtex-6 (дата обращения: 29.04.2020).

***The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FSFZ-0706-2020-0022).***

УДК 536.421 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.862.863

# Одномерная модель газофазного роста наностержней ZnO на кремниевых подложках

## One-dimensional Model of ZnO Nanorods Gas-phase Growth on Silicone Substrates

**Шарапов А. А.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*andrey.sharapov@phystech.edu*

**Матюшкин И. В., к. ф.-м. н.**
*старший научный сотрудник[1]*
*imatyushkin@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Sharapov A. A.**
***research scientist[1], postgraduate[2]***
*andrey.sharapov@phystech.edu*

**Matyushkin I. V., Ph.D**
***senior researcher[1]***
*imatyushkin@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

Один из методов получения высококачественных монокристаллических наностержней ZnO — газофазный рост. В работе описывается одномерная математическая модель роста нанострежней ZnO на поверхности $SiO_2$ в ходе данного процесса. В модели учтена теплопередача вдоль стержня от зоны экзотермической реакции образования кристаллической фазы ZnO. Модель позволяет количественно оценить скорость роста и распределение температур в твердой и жидкой фазе растущего наностержня.
**Ключевые слова:** оксид цинка; наностержни; газофазный рост; термодинамическая модель.

One of the methods for obtaining high-quality single-crystal ZnO nanorods is gas-phase growth. The paper describes a one-dimensional mathematical model of growth of ZnO nanorods on $SiO_2$ surface in the course of this process. The model accounts for the heat transfer along the nanorod from the exothermic reaction zone of ZnO crystal phase formation. The model makes it possible to quantitatively estimate the growth rate and temperature distribution in the solid and liquid phases of the growing nanorod.
**Keywords:** zinc oxide; nanorods; gas-phase growth; thermodynamic model.

***Введение***

Значимое направление развития кремниевой микроэлектроники, основанной на КМОП-технологии, — расширение элементной базы с применением новых материалов [1]. В частности, интерес представляют одномерные структуры оксида цинка — широкозонного полупроводникового материала, которому помимо микроэлектроники нашлось применение в областях оптоэлектроники, фотовольтаики, газо- и фотосенсорной техники.

Один из методов синтеза высококачественных монокристаллических наностержней ZnO — газофазный рост при давлении ниже атмосферного [2]. Процесс формирования стержней состоит из четырех этапов — формирование массива нанокапель Zn на поверхности кремниевой подложки, образование кристаллической фазы ZnO под каплей, рост наностержня и испарение капли, определяющее завершение процесса синтеза. Рассмотренная в данной работе модель относится к третьему этапу формирования наностержней.

***Модель газофазного роста наностержней ZnO***

Разработанная математическая модель связывает параметры реакции с величинами, характеризующими размер, температуру, молярное соотношение цинка и кислорода в жидкой фазе, а также распределение температуры в твердой кристаллической части наностержня. Химическая реакция на границе фаз описывается законом кинетики второго порядка. Выделяющаяся теплота расходуется на разогрев капли и передачу энергии в виде теплового потока, направленного вдоль стержня.

Для численного решения уравнения теплопроводности для стержня используется схема Кранка — Николсона, основанная на явно-неявной аппроксимации пространственной производной. Учет перемещения границ как между пленкой на подложке и стержнем, так и между стержнем и каплей производится применением процедуры перестроения сетки, привязанной к абсолютному положению в пространстве, с линейной экстраполяцией температуры.

***Выводы***

В результате программной реализации разработанной математической модели в среде MATLAB стало возможно оценить скорость роста и распределение температур в твердой и жидкой фазе растущего наностержня при разных параметрах реакции. Для повышения контролируемости процесса роста и количественного описания четвертого этапа формирования наностержней целесообразно определить параметры реакции, при которых синтез в зоне роста будет прекращаться в силу термодинамических причин. Кроме того, для описания латерального изменения геометрии стержня, наблюдающегося в ходе экспериментов, модель будет расширена до двумерной.

*Авторы благодарят за комментарии и консультации д.ф.-м.н., зав. экспериментально-технологической лабораторией ИПТМ РАН Редькина А. Н.*

***Литература***

1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — М., 1999. — С. 162–174.
2. Редькин А. Н., Рыжова М. В., Якимов Е. Е., Грузинцев А. Н. Упорядоченные массивы наностержней оксида цинка на кремниевых подложках // Физика и техника полупроводников, 2013. — Т. 47. — Вып. 2. — С. 216–222.

УДК 621.384 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.864.865

# Феноменологическая модель для метода направленной самосборки

## Phenomenological Model for Directed Self-assembly Method

**Литаврин М. В.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*mlitavrin@niime.ru*

**Горнев Е. С., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор**
***начальник управления РПТН[1]***
*egornev@niime.ru*

**Матюшкин И. В., к. т. н.**
***доцент, старший научный сотрудник[1]***
*imatyushkin@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Litavrin M. V.**
***researcher[1], postgraduate[2]***
*mlitavrin@niime.ru*

**Gornev E. S., corresponding member of RAS, Sc.D, professor**
***head of PTD management[1]***
*egornev@niime.ru*

**Matyushkin I. V., Ph.D**
***assistant professor, senior researcher[1]***
*imatyushkin@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе приводится компактная модель для симуляции самосборки блок-сополимера. Приведены результаты для самосборки внутри контактного окна, но модель может быть обобщена и на более сложные структуры.
**Ключевые слова:** направленная самосборка (DSA); клеточные автоматы; литография.

The paper presents a compact model for block-copolymer self-assembly simulation. The results are given for self-assembly within the contact hole, but the model can be generalized to more complex structures.
**Keywords:** directed self-assembly (DSA); cellular automata; advanced lithography.

***Введение***

Направленная самосборка (DSA) была внесена в дорожную карту ITRS как один из способов формирования структур с шагом менее 40 нм. Этот метод позиционируется как потенциальная альтернатива применению метода мультипаттернирования (multiple patterning) [1] для технологических норм 10 нм и менее, а также для исправления стохастических дефектов в процессах EUV-литографии [2]. Одной из актуальных проблем метода DSA является его интеграция с дизайном и OPC. Проведение такой кооптимизации накладывает жесткие требования на быстродействие моделей DSA [3], в связи с чем становится актуальной разработка быстрых моделей направленной самосборки.

***Модель DSA***

Модель симулирует самосборку блок-сополимера внутри заранее сформированного литографией рельефа. Приводятся результаты для самосборки внутри контактного окна, но возможно обобщение на случай других структур.

Основные положения и характеристики модели [4]: цепь блок-сополимера аппроксимирована сегментами Куна, что предполагает жесткие звенья, свободно вращающиеся относительно друг друга; пространственный квант клеточного автомата взят равным длине Куна для полистирола. Полимер аппроксимируется сегментами Куна (сегмент Куна состоит из нескольких мономерных единиц; сегменты Куна могут свободно вращаться относительно друг друга). Весь объем аппроксимируется шестигранными призмами (гексагональная сетка параллельна плоскости пластины, обобщенной на 3D). Прилегающие горизонтальные слои расположены относительно друг друга со сдвигом для лучшей однородности по пространству, период этого сдвига равен 2. В модели используется обобщенный шаблон окрестности Неймана. Режим работы автомата блочно-асинхронный. Для взаимодействия сегментов исследованы различные потенциалы взаимодействия, в т. ч. потенциал Леннарда — Джонса.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Гущин О. П., Литаврин М. В., Горнев Е. С. DSA — комплементарный метод усиления разрешения иммерсионной литографии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — С. 4–17.
2. Guerrero D. J. DSA and EUV: Complementary technologies to enable fine- pitch lithography. URL: https://sst.semiconductor-digest.com/2017/09/dsa-and-euv-complementary-technologies-to-enable-fine-pitch-lithography/ (дата обращения: 1.06.2020).
3. Lai K. et al. Computational lithography platform for 193i-guided directed self-assembly // Proc. SPIE 9052, Optical Microlithography XXVII, 90521A (March 31, 2014). DOI: 10.1117/12.2046920.
4. Gornev E., Litavrin M., Matyushkin I. and Gushin O. Cellular automata method for directed self-assembly modeling // Proc. SPIE 11022, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018, 110221N, 15 March 2019.

УДК 004.312 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.866.867

# Проектирование цифровых схем с поддержкой нескольких тактовых сигналов на примере разработки таймера для современного микроконтроллера

## Designing Digital Circuits with Multiple Clock Domains on the Example of Developing a Timer for a Modern Microcontroller

**Алексеев В. Д.**
***техник[1], магистрант кафедры ИЭМС[2]***
*valekseev@niime.ru*

**Васильев Е. С.**
***начальник лаборатории[1]***
*evasilev@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

**Alexeev V. D.**
***junior ASIC design engineer[1], master student[2]***
*valekseev@niime.ru*

**Vasilev E. S.**
***head of laboratory[1]***
*evasilev@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] National Research University of Electronic Technology*
*1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia*

В работе исследованы особенности и методы проектирования цифровых схем с поддержкой дополнительных тактовых сигналов. Разработан таймер микроконтроллера с мультиплексированием тактовых сигналов, на примере которого изучены возможные проблемы, возникающие при использовании нескольких тактовых сигналов, а также способы их решения.
**Ключевые слова:** таймер; микроконтроллер; системная шина; тактовый сигнал; мультиплексирование тактовых сигналов; glitch-free clock mux; согласование тактовых доменов; метастабильность.

The article examines the features and methods of designing digital circuits with the support of multiple clock signals. A microcontroller timer with multiplexing clock signals has been developed, on the example of which possible problems and solutions have been studied.
**Keywords:** timer; microcontroller; system bus; clock signals; glitch-free clock mux; CDC; metastability.

***Введение***

Наиболее удобной с точки зрения разработки логической схемы является ситуация, когда изменением всех ее сигналов управляет один общий тактовый сигнал [1]. Однако с развитием технологий производства [2] усложняются и цифровые устройства, а перед разработчиком нередко ставится задача реализовать поддержку проектируемым устройством нескольких тактовых сигналов. В частности, подобная задача может возникнуть при проектировании таймера для микроконтроллера. Для ее решения необходимо применить верные схемотехнические методы, позволяющие правильно переключать управляющий тактовый сигнал, а также исключить некорректный перенос данных вследствие их потери или возникновения метастабильности.

***Исследование методов мультиплексирования тактовых сигналов современных цифровых схем***

При некорректной реализации блока переключения тактового сигнала в проектируемом устройстве возможно возникновение двух ситуаций, способных вызвать сбой в его работе. Первой проблемой является появление кратковременных импульсов недопустимой длительности сразу после переключения с одного тактового сигнала на другой. Для того чтобы исключить их возникновение, применяется мультиплексор специальной конструкции [3]. При его использовании в составе таймера появляется еще один тактовый домен, в котором находятся основной счетчик таймера и ряд дополнительных триггеров. При некорректном переносе данных между доменами возможно появление метастабильности выходного значения триггеров [4]. В открытых источниках [5] описан ряд схемотехнических подходов для решения вышеуказанных проблем, но не показано, как именно следует применять данные схемы при проектировании таймера с мультиплексором тактовых сигналов.

***Выводы***

В результате анализа проблем, возникающих при проектировании цифровых схем с поддержкой нескольких тактовых сигналов, и схемотехнических решений, предназначенных для устранения указанных проблем, была спроектирована схема таймера с мультиплексированием тактовых сигналов. Разработанная схема таймера использована в составе проектов промышленного микроконтроллера и микроконтроллера для SIM-карт, разрабатываемых АО «НИИМЭ».

***Литература***

1. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2004. — 213 с.
2. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: В 2 частях. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2004. — 536 с.
3. Jovanovic B., Damnjanovic M. Glitch Free Clock Switching Techniques in Modern Microcontrollers // Proceedings of the 5th Small Systems Simulation Symposium, 2014. P. 119–122.
4. Clock Domain Crossing. Closing the Loop on Clock Domain Functional Implementation Problems. Technical paper. Cadence Design Systems, Inc. [Электронный ресурс]. URL: https://www.eecg.utoronto.ca/~pc/courses/432/2015/handouts/cdc_wp.pdf (дата обращения: 28.06.2021).
5. Clifford E. Cummings. Clock Domain Crossing (CDC) Design & Verification Techniques Using SystemVerilog. — M.: SNUG Boston, 2008. 56 p.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.868.869

# Исследование методов верификации качества SPICE-моделей субмикронных МОП-транзисторов

## Research on Methods for Verifying the Quality of Spice Models of Submicron MOS

**Кривенцев А. М.**
***инженер-конструктор***
*akriventsev@niime.ru*

**Шемякин А. В.**
***начальник лаборатории***
*ashemyakin@niime.ru*

**Потупчик А. Г.**
***начальник отдела***
*apotupchik@niime.ru*

**Шамхалов А. Э.**
***инженер***
*ashamhalov@niime.ru*

*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Kriventsev A. M.**
***design engineer***
*akriventsev@niime.ru*

**Shemyakin A. V.**
***head of laboratory***
*ashemyakin@niime.ru*

**Potupchik A. G.**
***head of department***
*apotupchik@niime.ru*

**Shamkhalov A. E.**
***engineer***
*ashamhalov@niime.ru*

*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В работе приведен набор качественных тестов для модели транзистора, протестирована модель, используемая в АО «НИИМЭ», представлены анализ результатов.
**Ключевые слова:** SPICE-модели; моделирование; верификация; качественные тесты.

The paper presents a set of quality tests of the transistor model that is used in MERI JSC. Besides, the results have been analyzed.
**Keywords:** SPICE-models; simulation; verification; quality tests.

### *Введение*

SPICE-модели используются разработчиками для проектирования интегральных схем. Несмотря на то что универсального алгоритма проверки модели быть не может, существуют требования к базовой функциональности, физичности. Целью данной работы является изучение методик проведения качественных тестов модели транзистора и разработка программы для ее верификации на этапе разработки.

### *Этапы тестирования модели*

За сравнительно короткое в историческом плане время технология изготовления интегральных микросхем прошла огромный путь [1]. На современном этапе развития микроэлектроники при разработке функциональных блоков ИС

используют модели, встроенные в комплект средств проектирования (PDK). От качества модели напрямую зависит не только результат работы разработчика, но и принципиальная возможность их создания [2]. Поэтому важно, чтобы модели приборов точно им соответствовали.

При разработке модели одним из начальных этапов ее верификации является набор качественных и количественных тестов [3]. Качественные тесты позволяют проверить, не противоречат ли данные модели физике полупроводников. Количественные тесты проводятся после качественных и позволяют проверить, насколько характеристики модели повторяют реальный прибор.

***Качественные тесты***

Правильно проведенные качественные тесты способны выявить аномальное поведение при любых режимах работы транзистора. Также с их помощью можно понять, насколько хорошо модель описывает разные физические (в т. ч. паразитные) эффекты.

Набор качественных тестов предложен Compact Model Council (CMC)[3, 4], ниже приведены некоторые из них:

- **тест на корректность TS-характеристик** (Triode-Saturation) — выходных характеристик МОП-транзистора $I_d(V_{gs})$ и $g_0(V_{gs})$;
- **тесты «мелкий шаг»** могут выявить разрывы на графике при широком диапазоне токов и напряжений;
- **тест Гуммеля на симметричность сток-исток** [5] позволяет проверить симметричность характеристик у симметричных транзисторов. Особенно важен для электрических цепей, которые в процессе моделирования переходят точку $V_{ds} = 0$;
- **тест Гуммеля на наклон характеристик** позволяет убедиться в достоверности моделирования при малых $V_{ds}$.

Набор тестов реализуется в виде надстройки для пакета программ MIO (Modeling Importing Optimizing), разрабатываемого в отделе моделирования АО «НИИМЭ».

***Литература***

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Шелепин Н. А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника, 2004. — № 9. — С. 30–35.
3. Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. — М.: ФИЗМАЛИТ, 2010. — 408 с. ISBN 978-5-9221-1200-0.
4. IEEE recommended practices #P1485 on: Test procedures for microelectronic MOSFET circuit simulator model validation/ Working Draft — completed 05/21/97.
5. McAndrew C. C. Validation of MOSFET model source and drain symmetry // IEEE Trans. on Electron Devices. 2006. Vol. 53. № 9. P. 2202–2206.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.870.871

# Моделирование распределения электрических полей в структуре с эффектом памяти с пористым low-k-диэлектриком в качестве буферного слоя

## Simulation of Electric Field Distribution in Structure with a Memory Effect with a Porous Low-k Dielectric as a Buffer Layer

**Орлов А. А.**
***младший научный сотрудник[1], студент магистратуры[2]***
*aorlov@niime.ru*

**Ганыкина Е. А.**
***научный сотрудник[1], аспирант[2]***
*eganykina@niime.ru*

**Резванов А. А., к. ф.-м. н.**
***начальник лаборатории[1,2]***
*arezvanov@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Orlov A. A.**
***junior researcher[1], master student[2]***
*aorlov@niime.ru*

**Ganykina E. A.**
***research assistant[1], postgraduate[2]***
*eganykina@niime.ru*

**Rezvanov A. A., Ph.D**
***head of the laboratory[1,2]***
*arezvanov@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе приведено моделирование распределения электрического поля в структурах с эффектом памяти с пористым low-k-диэлектриком в качестве буферного слоя в зависимости от значений величин открытой пористости.
**Ключевые слова:** мемристор; филамент; пористый low-k-диэлектрик.

The paper presents a simulation of the electric field distribution in structures with a memory effect with a porous low-k dielectric as a buffer layer depending on the values of the open porosity.
**Keywords:** memristor; filament; porous low-k dielectric.

***Введение***

Разработка элементов энергонезависимой памяти с низким энергопотреблением необходима для создания искусственных нейронный сетей и реализации высокоточных процессов их обучения. Основной проблемой, возникающей при реализации структур с эффектом памяти, является стохастический характер формирования проводящих филаментов, что может привести к значительному разбросу параметров устройств [1, 2].

***Буферный слой в структуре с эффектом памяти***

Одним из способов снижения разброса параметров в структуре с эффектом памяти является не только добавление буферного слоя (например Pt / Zr:$SiO_2$ / буферный слой / TiN), но и использование пористых материалов. В работе [3] показано, что переход от структуры Zr:$SiO_2$ к структуре Zr:P-$SiO_2$ позволяет уменьшить разброс рабочих параметров мемристора, существенно (в сотни раз) увеличить количество циклов переключения и стабильность высокоомных (HRS) и низкоомных состояний (LRS).

***Результаты моделирования***

В работе проведено моделирование распределения внешнего электрического поля в структуре P-$LiCoO_2$/P-$SiO_2$, описанной в работе [2], на которой возможно реализовать обучение нейронных сетей. Получено, что введение пористости позволяет контролировать процесс формирования филамента за счет увеличения напряженности электрического поля на краях пор, что потенциально позволяет снизить разброс рабочих параметров структур с эффектом памяти. Дополнительно показано, что повысить контролируемость формирования филамента можно за счет близкого расположения пор (использование высокопористых материалов или широкого распределения диаметра пор для конкретного материала) из-за сложения краевых эффектов, связанных с повышением напряженности электрического поля.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4. — Т. 177. — С. 60–64.
2. Gao Q., Huang A., Zhang J. et al. Artificial synapses with a sponge-like double-layer porous oxide memristor // NPG Asia Mater., 2021. V. 13. № 3.
3. Tsai T.-M., Chang K.-C., Zhang R. et al. Performance and characteristics of double layer porous silicon oxide resistance random access memory // Applied Physics Letters, 2013. V. 102. № 25. P. 253509.

УДК 537.311.4 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.872.874

# Исследование барьерных слоев для формирования медных контактов к транзисторной структуре

## Investigation into Barrier Layers for the Formation of Transistor Structure Copper Contact Plugs

**Горохов С. А.**
***младший научный сотрудник[1], студент магистратуры[2]***
*sgorohov@niime.ru*

**Патюков С. И., к. т. н.**
***начальник лаборатории[1]***
*spatyukov@niime.ru*

**Плаксин В. Г.**
***ведущий инженер-технолог[1]***
*vplaksin@niime.ru*

*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Gorokhov S. A.**
***junior researcher[1], master degree student[2]***
*sgorohov@niime.ru*

**Patyukov S. I., Ph.D**
***head of the laboratory[1]***
*spatyukov@niime.ru*

**Plaksin V. G.**
***Leading Process Engineer[1]***
*vplaksin@niime.ru*

*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе исследуются возможные барьерные слои (Ti/TiN/Ti, Ti/TiN/Ta, TaN/Ta) для формирования контактных окон к транзисторным структурам из меди.
**Ключевые слова:** контактное окно; барьерные слои; сопротивление; адгезия.

The paper investigates possible barrier layers (Ti/TiN/Ti, Ti/TiN/Ta, TaN/Ta) for forming vias to transistor structures made of copper.
**Keywords:** contact plug; barrier layers; resistance; adhesion.

***Введение***

До сих пор для заполнения контактных окон к транзисторной структуре используется вольфрам, несмотря на его более высокое удельное сопротивление, чем у меди. Связано это с тем, что медь быстро диффундирует в кремнии и образует глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. Поэтому переход к использованию меди для заполнения контактов требует разработки надежных барьерных слоев, чему и посвящена данная работа.

***Описание работы***

В работе были рассмотрены адгезионные свойства меди к различным материалам, на основании чего отобраны образцы, подходящие в качестве барьерных слоев для формирования контактных окон из меди. Был проведен эксперимент с нанесением выбранных слоев на пластину, последующим отжигом и исследованием его влияния на поверхностное сопротивление (рис. 1) и шероховатость поверхности.

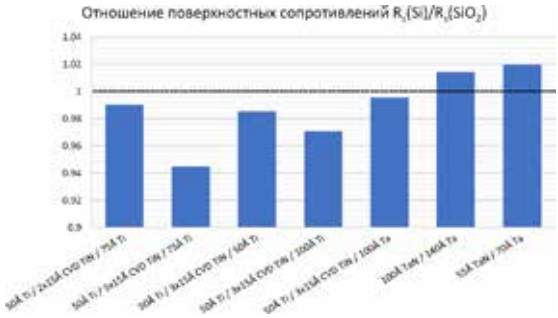



**Рис. 1.** Результаты поверхностных сопротивлений структур по отношению к аналогичным структурам на $SiO_2$

На основании результатов были отобраны многослойные структуры, обладающие лучшими адгезионными и барьерными свойствами (Ti/TiN/Ti, Ti/TiN/Ta, TaN/Ta). После этого были изготовлены пластины с контактными окнами и исследовано влияние некоторых параметров процессов осаждения барьерных слоев и зародышевого слоя меди на заполнение контактных окон с большим аспектным отношением. После ряда экспериментов были получены рабочие структуры с медными контактными окнами, при этом сопротивление цепочки контактов, а также показано, что транзисторов (ток утечки, ток насыщения, пороговое напряжение) полностью соответствуют спецификации.

***Литература***

1. Способ изготовления медной многоуровневой металлизации СБИС: пат. 2420827 Рос. Федерация. № 2010100321/28 / Красников Г. Я., Валеев А. С., Шелепин Н. А., Гущин О. П., Воротилов К. А., Васильев В. А., Аверкин С. Н.; заявл. 01.11.2010; опубл. 06.10.2011.
2. Горохов С. А. Расчет сопротивления элементов металлизации глубокосубмикронных СБИС // Международный форум «Микроэлектроника-2019»: сборник тезисов конф. — Гурзуф, 23–25 сентября 2019 г.

3. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
4. Красников Г. Я. Физико-технологические принципы и методы обеспечения качества КМОП БИС массового производства: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. — Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники». — Москва, 1996.
5. Khandelwal A., Wu F., Or J., Lai K., Gelatos J., Chang M. Evaluation of diffusion barriers for 32 nm Cu contact metallization // Nanochip Technology Journal. 2006. Vol. 4 (3). P. 2–5.

УДК 621.38 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.875.877

# Изучение влияния дисперсионной среды на процесс жидкофазной эксфолиации двумерных нанокристаллов $Bi_2Te_3$ для использования в датчиках ИК-диапазона спектра

## Solvent Impact on Properties of Liquid-phase Exfoliated $Bi_2Te_3$ Nanocrystals for Applications in Infrared Photonics

**Лаврентьев Н. А.**
***инженер[1], магистрант[2]***
*lavrentev.na@phystech.edu*

**Мирофянченко А. Е., к. т. н.**
***начальник лаборатории[1]***
*mirofyanchenko@gmail.com*

**Мирофянченко Е. В., к. т. н.**
***ведущий инженер-конструктор[1]***
*mirofianchenko@gmail.com*

**Попов В. С., к. х. н.**
***начальник цетра[1], ведущий научный сотрудник[2], доцент[2]***
*vs_popov_chem@mail.ru*

*[1] ГНЦ АО «НПО «Орион»*
*111538, г. Москва, ул. Косинская, 9*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Lavrentyev N. A.**
***intern[1], master student[2]***
*lavrentev.na@phystech.edu*

**Mirofyanchenko A. E., Ph.D**
***Head of Laboratory[1]***
*mirofyanchenko@gmail.com*

**Mirofianchenko E. V., Ph.D**
***Leading Design Engineer[1]***
*mirofianchenko@gmail.com*

**Popov V. S., Ph.D**
***Head of Department[1], Leading Researcher, Laboratory of Photonics of Quantum-Size Structures[2]***
*vs_popov_chem@mail.ru*

*[1] "NPO Orion" SSJ JSC*
*9 Kosinskaya St., Moscow, 111538, Russia*
*Moscow, Russia*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе исследовался процесс получения двумерных нанокристаллов теллурида висмута ($Bi_2Te_3$) для использования в датчиках короткого и среднего ИК-диапазона. Были получены образцы в различных дисперсионных средах и при разных режимах жидкостной эксфолиации. Нанокристаллы оценивались разными методами. Получены зависимости спектров поглощения материала, показывающие возможность направленного изменения спектральных характеристик.
**Ключевые слова:** теллурид висмута; ВАХ; топологический изолятор; фотоприемник; ИК-диапазон.

This work is devoted to investigation into synthesis two-dimensional bismuth telluride nanocrystals of ($Bi_2Te_3$) for use in a mid-IR sensor. Samples have been obtained in different solvents and under different modes of LPE, as well as spectral characteristics showing changes due to the size of crystallites.
**Keywords:** bismuth telluride; IV-characteristics; topological insulator; photodetector; mid-IR spectrum.

***Введение***

Несмотря на активное развитие методов получения двумерных углеродных материалов с широкоспектральным фотоотокликом, они имеют низкую чувствительность и низкий коэффициент усиления проводимости [1]. Теллурид висмута в последнее время привлекает к себе внимание благодаря своим уникальным свойствам [1–3].

Формирование двумерных нанокристаллов теллурида висмута методом жидкофазной эксфолиации уже позволяет получать воспроизводимые структуры для детекторов ИК-диапазона спектра [4].

***Описание эксперимента***

В работе из объемного теллурида висмута методом жидкостной эксфолиации формировали суспензии нанокристаллов как в различных дисперсионных средах, так и при различных режимах ультразвуковой обработки. Методами микроскопии и динамического рассеяния света оценивались толщины и латеральные размеры частиц. Были получены рамановские спектры и данные рентгеновской дифрактометрии, показывающие отличия строения кристаллической решетки нанокристаллов от объемного материала. Кроме этого, методом drop-casting были сформированы тестовые фоторезистивные структуры.

***Результаты и обсуждение***

Спектры полного внутреннего отражения (ATR) и спектры пропускания пленок, полученных методом dip-coating, подтверждают возможность направленного изменения спектральных характеристик, вызванных изменением ширины запрещенной зоны. В частности, показано влияние режима ультразвуковой обработки на спектральные характеристики материала, что дает возможность направленного получения материала с заданными спектральными свойствами для перспективных устройств ИК-фотосенсорики.

Характер поведения ВАХ полученных структур может говорить о наличии фоточувствительности в ИК-диапазоне спектра.

***Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-20080 и Фонда содействия инновациям в рамках договора № 16551ГУ/2021.***

***Литература***

1. Попов В. С., Егоров А. В., Пономаренко В. П. Получение фоточувствительных элементов на основе двумерного теллурида висмута и их вольт-амперные характеристики // Прикладная физика, 2020. — № 5. — С. 50.
2. Wang B., Zhong S., Xu P., Zhang H. Recent development and advances in Photodetectors based on two-dimensional topological insulators // J. Mater. Chem. C., 2020, 8, 15526.
3. Пономаренко В. П. и др. Фото-и наноэлектроника на основе двумерных 2D-материалов Часть II. 2D-фототранзисторы // Успехи прикладной физики. — 2020. — Т. 8. — С. 33.
4. Пономаренко В. П. и др. Фото- и наноэлектроника на основе двумерных 2D-материалов Часть I. 2D-материалы: свойства и синтез // Успехи прикладной физики. — 2019. — Т. 7. — С. 11.

***The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project № 18-29-20080 and the Fund for the Promotion of Innovations under the Agreement № 16551GU/2021.***

УДК 53.06 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.878.879

# Теоретическое и экспериментальное исследование невоспроизводимости параметров переключения в элементах резистивной памяти на основе оксида гафния

## Theoretical and Experimental Study of Intrinsic Variability in Hafnium Oxide Based RRAM

**Федотов М. И.**
***младший научный сотрудник***[1]
*mihailfedotow@yandex.ru*

**Ковешников С. В., к. ф.-м. н.**
***зам. директора по инновациям***[2]
*skoveshnikov@iptm.ru*

[1] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
[2] *ИПТМ РАН*
*142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*

**Fedotov M. I.**
***junior researcher***[1]
*mihailfedotow@yandex.ru*

**Koveshnikov S. V., Ph.D**
***innovations director deputy***[2]
*skoveshnikov@iptm.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *MIT RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432*

В работе проведено детальное экспериментальное исследование процессов переключения в элементе RRAM на основе оксида гафния. Сформулирована и доказана гипотеза множественности проводящих филаментов. Предложен способ создания в ячейке памяти единственного проводящего филамента.
**Ключевые слова:** резистивная память; оксид гафния; характеристики переключения; невоспроизводимость параметров переключения.

The paper presents a detailed experimental study of intrinsic variability in HfOx-based RRAM, statistical analysis of key switching parameters variability, and analytical model of resistive switching that explains the obtained experimental data. The core of the model is the assumption that multiple conductive filaments could be formed in the same RRAM cell. Additionally, a method of creating a singular and precisely positioned conductive filament has been proposed.
**Keywords:** resistive memory; hafnium oxide; switching characteristics; cycle-to-cycle variability.

***Введение***

Невоспроизводимость параметров переключения является ключевой проблемой RRAM, препятствующей достижению надежного многоуровневого переключения, необходимого для повышения плотности записи информации в массивах RRAM и их применения в нейроморфных вычислениях. Предположительно связано это с наличием нескольких проводящих филаментов, число и влияние которых на проводимость в ячейке могут меняться от цикла к циклу.

***Эксперимент***

Было проведено экспериментальное исследование невоспроизводимости параметров переключения в ячейке RRAM на основе оксида гафния — напряжения переключения и сопротивлений в низко- и высокоомном состояниях. Определен ряд зависимостей параметров переключения от условий проведения эксперимента — ограничений тока и напряжения.

***Модель многих филаментов***

Для объяснения результатов эксперимента была разработана аналитическая модель резистивного переключения, основанная на предположении, что в ячейке памяти может одновременно образовываться несколько проводящих филаментов. Проведено моделирование разброса сопротивления в низко- и высокоомном состояниях. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает гипотезу многих филаментов.

***Создание единственного филамента***

На основе технологий ИПТМ РАН предложен способ создания единственного и строго позиционированного проводящего филамента, основанный на локальном (на площади в несколько нанометров) внедрении в диэлектрик заряженных дефектов с помощью электронного пучка. Внедренный заряд создает локальную неоднородность электрического поля в ячейке, что способствует росту единственного проводящего филамента, а также снижает энергопотребление ячейки RRAM.

***Литература***

1. Fantini A., Goux L., Degraeve R., Wouters D. J., Raghavan N., Kar G., Belmonte A., Chen Y.-Y., Govoreanu B., Jurczak M. Intrinsic switching variability in HfO2 RRAM // International Memory Workshop IMW, 2013. P. 30–33.
2. Ambrogio S., Balatti S., Cubeta A., Calderoni A., Ramaswamy N. and Ielmini D. Statistical Fluctuations in HfOx Resistive-Switching Memory: Part I — Set/Reset Variability // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 61. № 8. P. 2912–2919, August 2014.
3. Sowinska M., Bertaud T., Walczyk D., Thiess S., Schubert M., Lukosius M., Drube W., Walczyk C. and Schroeder T. Hard x-ray photoelectron spectroscopy study of the electroforming in Ti/HfO2-based resistive switching structures // Applied Physics Letters. Vol. 100. № 23, 2012.
4. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
5. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.

УДК 621.3.049.774 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.880.881

# Интегральные диаграммообразующие схемы фазированных антенных решеток на основе 180-нм SiGe БиКМОП-технологии

## Phased Array Integrated Beamformers Based on 180 nm SiGe BiCMOS Technology

**Филиппов И. Ф.**
***инженер, аспирант***
*IFFilippov@sevsu.ru*

**Вертегел В. В., к. т. н.**
***доцент***
*VVVertegel@sevsu.ru*

**Гимпилевич Ю. Б., д. т. н., профессор**
***gimpilevich@sevsu.ru***

*Севастопольский государственный университет*
*299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33*

**Filippov I. F.**
***engineer, postgraduate***
*IFFilippov@sevsu.ru*

**Vertegel V. V., Ph.D**
***Associate Professor***
*VVVertegel@sevsu.ru*

**Gimpilevich Y. B., Sc.D, professor**
*gimpilevich@sevsu.ru*

*Sevastopol State University*
*33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053*

Представлены результаты исследования и разработки СВЧ интегральных диаграммообразующих схем фазированных антенных решеток на основе SiGe БиКМОП-технологии с топологическими нормами 180 нм.
**Ключевые слова:** диаграммообразующее устройство; БиКМОП; СВЧ; фазированные решетки; SiGe.

This paper presents the research and design results of phased array microwave integrated beamformers based on 180 nm SiGe BiCMOS technology.
**Keywords:** beamformer; BiCMOS; microwave; phased arrays; SiGe.

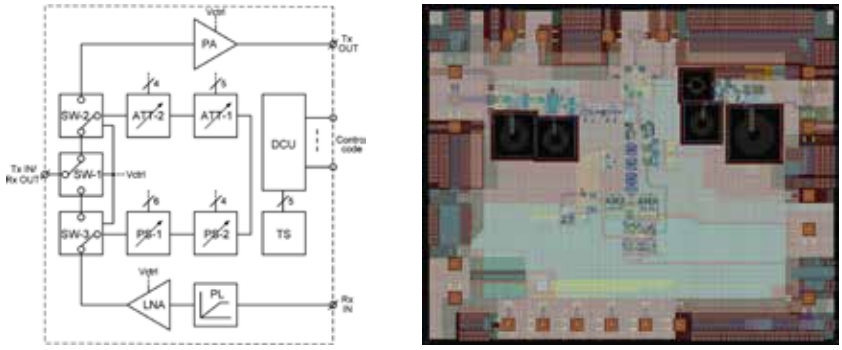
### *Введение*

Фазированные антенные решетки (ФАР) находят применение в радиолокации, радионавигации, системах мобильной и спутниковой связи. Актуальной задачей является снижение стоимости ФАР путем разработки и применения сверхвысокочастотных (СВЧ) интегральных диаграммообразующих схем (ДОС) различных частотных диапазонов и конфигураций.

### *Основная часть*

В работах [1, 2] показана актуальность разработки Si КМОП и SiGe БиКМОП интегральных ДОС, содержащих в своем составе СВЧ-фазовращатели, аттенюаторы, усилители и переключатели. Для достижения требуемых параметров ДОС в рамках выбранной технологии разработчик осуществляет выбор структурной схемы, типа и схемотехнических решений функциональных блоков управления

амплитудой и фазой СВЧ-сигнала. Выбор трехпортовой структуры с «общим плечом» (рис. 1*а*) позволяет повысить степень интеграции и соответственно снизить стоимость ДОС. А применение корректирующих цепей и алгоритмов — получить характеристики, сравнимые с лучшими зарубежными аналогами.




*а* *б*

**Рис. 1.** Структурная схема (*а*) и топология (*б*) разработанной ДОС

По результатам исследования возможных структурных, схемотехнических и топологических решений были разработаны интегральные ДОС S-, C- и X-диапазонов. Выбор схемотехники векторного модулятора для реализации управляемых фазовращателей и аттенюаторов обеспечивает коэффициент передачи ДОС более единицы. Развязка между каналами всех образцов — не хуже 35 дБ. Возвратные потери по входу/выходу превышают 10 дБ. Площадь топологии ДОС, представленной на рис. 1*б*, составляет 7,35 мм$^2$.

***Выводы***

В работе представлены результаты проектирования интегральных ДОС на основе 180-нм SiGe БиКМОП-технологии, которые могут найти применение при построении фазированных антенных решеток S-, C- и X-диапазонов. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с характеристиками ближайших известных прототипов. Показана возможность коррекции параметров разработанных ДОС.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90128.***

***Литература***

1. Benson K. Phased Array Beamforming ICs Simplify Antenna Design // Analog Dialogue, Norwood, MA, Jan. 2019. Vol. 51 (3). P. 1–4.
2. Rumyancev I.A., Korotkov A.S. Survey on Beamforming Techniques and Integrated Circuits for 5G Systems // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia, Oct. 2019. P. 76–80.

***The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90128.***

УДК 538.911 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.882.883

# Силовая полупроводниковая электроника и микроэлектроника: полупроводниковые материалы, технологии, компонентная база

## Power Semiconductor Electronics and Microelectronics. Semiconductor Materials. Technologies. Component Base

**Козлов В. А., к. ф.-м. н.**
***в. н. с.*** [1,2]
[1] *АО «ПК «ФИД-Техника»*
*г. Санкт-Петербург*
*kozlov@fidtech.com*
[2] *ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН*
*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*

**Kozlov V. A., Ph.D**
***leading researcher*** [1,2]
[1] *"PK" FID-Technika JSC*
*St. Petersburg*
*kozlov@fidtech.com*
[2] *Ioffe Institute*
*26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia*

В работе представлен обзор современного состояния российской силовой электроники в части используемых полупроводниковых материалов, технологий и компонентной базы. Сделан анализ имеющихся проблем и успехов в данной области электроники, а также перспектив ее развития.
**Ключевые слова:** силовая электроника; силовые полупроводиковые приборы; кремний; карбид кремния; нитрид галлия; арсенид галлия; диффузия; эпитаксия; ионная имплантация; бондинг (bonding); спекание (sintering); радиационные технологии; компонентная база силовой и импульсной электроники.

The paper presents an overview of the current state of the art for Russian power electronics in terms of the semiconductor materials, technologies and component base used. An analysis has been made of the existing problems and successes for this field of electronics and its prospects for development as well.
**Keywords:** power electronics; power semiconductor devices; silicon; silicon carbide; gallium nitride; gallium arsenide; diffusion; epitaxy; ion implantation; bonding; sintering; radiation technologies; component base of power and pulse power electronics.

### *Введение*

Силовая полупроводниковая электроника является одним из важнейших направлений развития электроники в целом, так как ее приборы являются неотлемлемой частью любого электронного устройства и в значительной степени определяют энергетическую эффективность его работы. Приборы силовой электроники аналогичны по физическим принципам работы, основам конструирования и методам изготовления своим микроэлектронным аналогам, но отличаются существенно

большей мощностью и размерами кристаллов. В настоящей работе рассмотрены особенности полупроводниковых материалов, технологий и элементной базы отечественной силовой электроники с анализом имеющихся проблем и успехов. Особое внимание уделяется материалам, технологиям и приборам мощной быстродействующей силовой и импульсной электроники, в которых Россия сохраняет конкурентоспособность на мировом рынке или даже превосходит зарубежные аналоги по совокупности их технико-экономических параметров.

***Основная часть***

*Обзор состояния работ в области силовой электроники России*

1. Материалы современной силовой электроники:

а) кремний — Si;

б) арсенид галлия — GaAs;

в) карбид кремния — SiC;

г) нитрид галлия — GaN;

Особое внимание уделяется опыту и успешным примерам использования GaAs и гетероструктур GaAs–$A_3B_5$ для создания элементной базы отечественной высокочастотной силовой электроники как альтернативы зарубежным приборам на основе GaN и SiC.

2. Технологии силовой электроники:

а) ростовые технологии изготовления мощных структур (эпитаксия, диффузия, ионная имплантация, твердофазное сращивание, ...) и их особенности;

б) постростовые технологии изготовления приборных чипов силовой электроники (планаризация и утонение, травление, металлизация, разделение на чипы, ...).

в) модифицирование и коррекция характеристик кристаллов пучками ионов высоких энергий.

3. Технологии сборки кристаллов в корпуса (пайка, сплавление, диффузионная сварка, «эвтектическое» соединение, низкотемпературное спекание наночастиц Ag).

4. Компонентная база традиционной силовой электроники:

а) высоковольтные мощные тиристоры (SCR, GTO, IGCT, ...);

б) мощные транзисторы (BT, MOSFET, JFET, IGBT, ...);

в) высоковольтные силовые диоды (FRED, CAL HD, ESD, FCID);

г) мощные быстродействующие российские приборы силовой импульсной электроники (LASS-тиристоры, RSD-динисторы, DSRD и SOS-диоды, FID-ключи, ...) — компонентная база сверхмощной импульсной техники микронано-пикосекундного диапазона.

УДК 537.862 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.884.885

# Метаматериал с высоким значением диэлектрической проницаемости на основе цилиндров между проводящими слоями

## Metamaterial with High Dielectric Constant Based on Cylinders Between Conductive Layers

**Ларионов М. Ю.**
***аспирант*[1]**
*xmishax12@mail.ru*

**Соболев А. С.**
***старший научный сотрудник*[2]**
*sobolev@hitech.cplire.ru*

[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
[2] *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН*
*12009, г. Москва, ул. Моховая, 11*

**Larionov M. Y.**
***postgraduate student*[1]**
*xmishax12@mail.ru*

**Sobolev A. S.**
***senior researcher*[2]**
*sobolev@hitech.cplire.ru*

[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
[2] *Kotel'nikov IRE RAS, Moscow*

Предложена модель метаматериала, имеющего относительную диэлектрическую проницаемость, равную 350, а также методика оценки его диэлектрической проницаемости.
**Ключевые слова:** метаматериал; элементарная ячейка; электрически малая антенна.

A model of a metamaterial with a relative dielectric constant equal to 350 has been proposed, as well as a method for assessing its dielectric constant.
**Keywords:** metamaterial; elementary cell; electrically small antenna.

### *Введение*

На сегодняшний день одной из актуальных задач в области СВЧ, в частности в области RFID, является создание электрически малых антенн. Для решения этой задачи в данной работе используется метаматериал, обладающий повышенной диэлектрической проницаемостью ε. Конструкции антенны и метаматериала созданы при помощи численного моделирования в среде CST Microwave Studio.

***Основная часть***

Метаматериал представляет собой печатную плату на основе СВЧ-материала ФАФ-4Д с периодическим массивом металлизированных отверстий. На рис. 1 показана модель метаматериала. Антенна представляет собой слой металлизации и располагается поверх метаматериала.

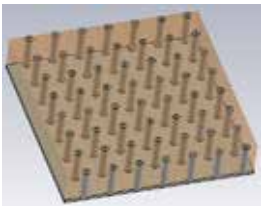


**Рис. 1.** Модель метаматериала

За счет малого зазора между антенной и металлизированными отверстиями достигается большая погонная емкость, что приводит к уменьшению фазовой скорости волны, что означает повышенное значение диэлектрической проницаемости метаматериала.

Для оценки диэлектрической проницаемости метаматериала была использована теория линии передачи Так, была получена теоретическая зависимость диэлектрической проницаемости от толщины диэлектрического зазора в метаматериале. На частоте для радиоидентификации 867 МГц значение постоянной равно 350.

***Выводы***

В работе предложена новая конструкция метаматериала на основе печатной платы, предложены методы оценки его параметров.

***Литература***

1. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот // Журнал технической физики, 2013. — Т. 83. — Вып. 1. — С. 3–28.
2. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.

УДК 681.586.78 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.886.887

# Разработка датчика температуры на основе транзисторов с инжекционно-емкостной связью

## Developing a Temperature Sensor Based on Transistors with Injection-Capacitive Coupling

**Иванов Д. Н.**
***аспирант*[1]**
*ivanovdmitry@rocketmail.com*

**Леонов А. В., к. ф.-м. н.**
***научный сотрудник*[2]**
*alex25.08@mail.ru*

**Мурашев В. Н., д. т. н., профессор**[1]
*vnmurashev@mail.ru*

[1] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*
*119049, г. Москва, Ленинский просп., 4*
[2] *ИПТМ РАН*
*142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*

**Ivanov D. N.**[1]
***postgraduate***
*ivanovdmitry@rocketmail.com*

**Leonov A. V.**[2]
***researcher***
*alex25.08@mail.ru*

**Murashev V. N.**[1]
***professor***
*vnmurashev@mail.ru*

[1] *National University of Science and Technology MISIS*
*4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia*
[2] *MIT RAS*
*6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432*

В работе показана возможность создания датчика температуры на основе транзисторов с инжекционно-емкостной связью, что позволяет в дальнейшем разрабатывать высокочувствительные датчики внешних воздействий с частотным выходом и низким энергопотреблением.
**Ключевые слова:** датчик температуры; транзистор; приборы с инжекционно-емкостной связью; чувствительный элемент.

The article shows the possibility of creating a temperature sensor based on transistors with injection-capacitive coupling, which allows in the future developing highly sensitive sensors of external influences with a frequency output and low power consumption.

**Keywords:** temperature sensor; transistor; devices with injection-capacitive coupling; sensing element.

***Введение***

Известно, что приборы с зарядовой связью (ПЗС) представляют собой устройства последовательного принципа действия. При этом приборы с инжекционно-емкостной связью (ПИЕС) отличаются от ПЗС асинхронным способом перемещения информационного заряда по цепочке пикселей. Здесь под пикселем понимается ячейка транзистора и пассивных элементов (емкости и сопротивления), необходимых для функционирования элемента как в активном, так и пассивном режиме. Такое устройство позволяет достичь рекордно низкого потребления энергии по сравнению с традиционными пиксельными микросхемами.

***Объект исследования***

Целью данной работы является проверка работоспособности макета датчика температуры на транзисторах с инжекционно-емкостной связью, оценка зависимости выходной частоты указанной схемы от температуры окружающей среды.

***Выводы***

Проверка работоспособности датчика температуры на основе транзисторов с инжекционно-емкостной связью позволяет положительно оценить возможность создания чувствительных элементов внешних воздействий, изготовленных по такому принципу. Такие элементы, кроме высокой чувствительности и экономичности, позволяют выводить сигнал в виде частоты, что упрощает его обработку в датчиковых системах сбора и передачи информации.

***Литература***

1. Леготин С. А., Ившин П. А., Мурашев В. Н., Орлова М. Н., Сотников А. В. Функционально интегрированное устройство на основе кремния для измерения температуры // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2007. — № 4. — С. 63–65.
2. Мурашев В. Н., Волков Д. Л., Леготин С. А., Орлова М. Н. Полупроводниковые радиационно-чувствительные детекторы на основе функционально интегрированных структур // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2009. — № 3. — С. 47–51.
3. Мурашев В. Н., Леготин С. А. Динамическое последовательное функциональное устройство / Патент на изобретение № 2392672 от 20.06.2010 г.
4. Иванов Д. Н., Леонов А. В. Преобразователь магнитного поля с функционально-интегрированной структурой / Патент РФ № 2743625.

УДК 519.688 + 004.94 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.888.889

# Математическое моделирование мемристора с учетом роста температуры в ходе резистивного переключения

## Mathematical Modeling of Memristor Considering Temperature Increase in the Process of Resistance Switching

**Кузнецов С. Е.**
***техник[1], студент магистратуры[2]***
*[1] АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*[2] Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
*sergey.y.kuznetsov@phystech.edu*

**Kuznetsov S. E.**
***technician[1], master's student[2]***
*[1] Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
*sergey.y.kuznetsov@phystech.edu*

В статье рассмотрено моделирование мемристора, учитывающее влияние роста температуры на процесс резистивного переключения. Указаны основные параметры мемристора, которые зависят от температуры. Разработана численная модель, учитывающая зависимость подвижности кислородных вакансий от температуры и саморазогрев активного слоя. Показано, что повышение температуры снижает время переключения устройства, рассмотрены вопросы выбора функции окна и оптимизации модели.
**Ключевые слова:** моделирование; мемристор; резистивное переключение; температура; подвижность кислородных вакансий; оксиды переходных металлов.

This work presents memristor modelling, considering the influence of temperature growth on memristor operation. Key parameters that depend on temperature have been defined. Numerical model considering the dependence of vacancy mobility on temperature and self-heating of the active layer has been proposed. Analysis has shown that temperature increase decreases switching time; problems of window function choice and model optimization have been investigated.
**Keywords:** modeling; memristor; resistive switching; temperature; oxygen vacancy mobility; transition metal oxides.

Влияние температуры заметно на экспериментальных ВАХ мемристора, однако не слишком хорошо изучено. Целью данной работы было построение компактной математической модели, моделирующей процесс перехода между низко- и высокопроводящими состояниями мемристора, с учетом изменения температуры.

В первую очередь необходимо выделить те параметры модели, в которых температура присутствует. Одним из ключевых параметров компактной модели,

который зависит от температуры, является подвижность кислородных вакансий. В работе [1] она выражается по формуле (1)

$$\mu_v = \frac{\sigma M}{N_A e n \rho}. \quad (1)$$

Проводимость σ в числителе для оксидов переходных металлов в работе [2] предлагается вычислять по формуле (2)

$$\sigma = \sigma_{0,Mott} T^{-2s} \exp\left(-\left(\frac{T_{0,Mott}}{T}\right)^s\right) + \sigma_{0,ES} T^{-2s} \exp\left(-\left(\frac{T_{0,ES}}{T}\right)^s\right), \quad (2)$$

которая является обобщением законов Мотта и Эфроса — Шкловского для прыжковой проводимости с переменной длинной прыжка.

Изменение температуры в ходе процесса переключения в [3] выражается при помощи выражения (3)

$$T = T_0 + \frac{R_{th}}{R} V^2. \quad (3)$$

***Выводы***

1) Показано, что увеличение температуры ускоряет процесс резистивного переключения.
2) Полученная модель учитывает саморазогрев мемристора в процессе переключения.
3) Полученное математическое описание позволяет параметризовать биполярные мемристоры без привязки к материалу активного слоя, включая мемристоры с окном памяти, превышающим два порядка.

***Литература***


1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
2. Singh J., Raj B. Temperature dependent analytical modeling and simulations of nanoscale memristor // Engineering science and technology, an international journal, 2018. V. 21. № 5. P. 862–868.
3. Yildiz A. et al. Electrical properties of TiO2 thin films // Journal of Non-Crystalline Solids, 2008. V. 354. № 45–46. P. 4944–4947.
4. Ielmini D. Modeling the universal set/reset characteristics of bipolar RRAM by field- and temperature-driven filament growth // IEEE Transactions on Electron Devices, 2011. V. 58. № 12. P. 4309–4317.
5. Biolek Z., Biolek D., Biolkova V. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift // Radioengineering, 2009. V. 18. № 2.
6. Corinto F., Ascoli A. A boundary condition-based approach to the modeling of memristor nanostructures // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012. V. 59. № 11. P. 2713–2726.

УДК 621.3 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.890.891

# Типовая оценочная спецификация на фотошаблоны критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 28 нм

## Generic Photomask Specification for Critical Litho Layers of 28 nm Node

**Балан Н. Н., к. т. н.**
***ведущий инженер-конструктор***
*nbalan@niime.ru*

**Иванов В. В.**
***заместитель начальника отдела проектирования фотошаблонов***
*vlaivanov@niime.ru*

**Панкратов А. Л.**
***начальник отдела проектирования фотошаблонов***
*apankratov@niime.ru*

**Харченко Е. Л.**
***инженер-конструктор 2-й категории***
*ekharchenko@niime.ru*

*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Balan N. N., Ph.D**
***leading engineer***
*nbalan@niime.ru*

**Ivanov V. V.**
***deputy head of MDP Department***
*vlaivanov@niime.ru*

**Pankratov A. L.**
***head of MDP Department***
*apankratov@niime.ru*

**Kharchenko E. L.**
***design engineer***
*ekharchenko@niime.ru*

*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

Описана классификация основных требований, предъявляемых к фотошаблонам, используемым при производстве современных СБИС. Рассматривается вклад допусков на точность размещения и критические линейные размеры элементов рисунка фотошаблона, а также на параметры фазосдвигающего слоя в бюджеты литографических операций. Приводится типовая оценочная спецификация на фотошаблоны критических литографических слоев технологии производства изделий проектных норм 28 нм.

**Ключевые слова:** фотошаблон; проекционная фотолитография.

This work describes the classification of the basic requirements for the photomasks used in VLSI production. A method for developing a photomask specification based on the lithographic requirements has been proposed. Typical generic specification for 28 nm node critical photomasks, developed using the proposed method, has been given.
**Keywords:** photomask; projection photolithography.

Корректная формулировка требований к параметрам фотошаблона [1, 2] (таким как допуски на размер и точность размещения топологических элементов, параметры маскирующего слоя, допустимой дефектности и т. п.) является необходимым условием достижения приемлемого качества литографических операций, а следовательно, и всего технологического процесса в целом.

Проведен анализ тенденций изменения требований к параметрам фотошаблонов по мере развития полупроводниковой технологии. Определен вклад допусков на параметры ФШ в бюджеты литографических операций (по совмещению, глубине фокуса и т. д.) для процессов иммерсионной фотолитографии с длиной волны рабочего излучения $\lambda = 193$ нм. Разработан метод составления типовой оценочной фотошаблонной спецификации с точки зрения удовлетворения требованиям к операциям проекционной фотолитографии. В качестве источника таких требований использованы данные стандарта на технологические процессы и оборудование ISMI [3].

***Выводы***

В работе на основе моделирования процессов проекционной фотолитографии разработана типовая оценочная спецификация на ФШ критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 28 нм (на примере затворного слоя).

***Литература***

1. Красников Г. Я., Валеев С. А. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — С. 180–201.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. — Т. 2. — М.: Микрон-Принт, 1999.
3. ISMI 450 mm Equipment Performance Metrics v5.0. — International SEMATECH Manufacturing Initiative, 2010.

УДК 004.89 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.892.893

# Анализ эффективности применения бинарных нейронных сетей для распознавания речи

## Analysing the Efficiency of Using Binary Neural Networks for Speech Recognition

**Мошкарова Л. А.**
***младший научный сотрудник***
*lmoshkarova@niime.ru*

**Тельминов О. А., к. т. н.**
***начальник лаборатории***
*otelminov@niime.ru*

*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Moshkarova L. A.**
***junior researcher***
*lmoshkarova@niime.ru*

**Telminov O. A., Ph.D**
***head of the laboratory***
*otelminov@niime.ru*

*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В работе исследуется возможность распознавания русскоязычной речи с применением нормированных по мощности кепстральных коэффициентов и бинарных нейронных сетей.
**Ключевые слова:** распознавание русской речи; бинарные нейронные сети; PNCC.

The paper presents the possibility of Russian speech recognition using power-normalized cepstral coefficients and binary neural networks.
**Keywords:** Russian speech recognition; binary neural networks; PNCC.

### *Введение*

Распознавание речи — широко распространенная и востребованная задача. Наиболее эффективными решениями считаются распознавание с помощью скрытых марковских моделей или рекуррентных нейронных сетей. Целью данной работы является исследование применимости бинарных нейронных сетей для распознавания русской речи.

### *Распознавание речи*

Для извлечения акустических признаков применялся кепстральный анализ, а именно нормированные по мощности кепстральные коэффициенты (PNCC — power-normalized cepstral coefficients [1]). Различные методы извлечения акустических признаков были исследованы в прошлой работе [2]. PNCC показал себя

наиболее эффективным и точным методом для русской речи. При поиске коэффициентов используется степенная зависимость, также применяется алгоритм подавления шума, основанный на асимметричной фильтрации, который подавляет фоновое возбуждение. Признаки для обучения сети были извлечены из набора данных VoxForge.

Бинарные нейронные сети характеризуются тем, что веса нейронов могут принимать только два значения: ноль и единицу. Точность распознавания бинарными нейронными сетями ощутимо ниже точности распознавания традиционными методами, однако бинарные сети привлекательны простотой аппаратной реализации. Помимо входного слоя, сеть состоит из двух бинарных слоев 64×64 и 64×33. Число 64 удобно для аппаратной реализации, а 33 соответствует буквам алфавита. Аппаратная реализация может быть выполнена с помощью устройств традиционной КМОП-технологии [3]. Также перспективным является решение реализации бинарной сети на мемристорном кроссбаре [4]. Тогда высокое и низкое сопротивления мемристоров будут соответствовать весам нейронов.

***Литература***

1. Kim C., Stern R. M. Power-normalized cepstral coefficients (PNCC) for robust speech recognition // IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 2012.
2. Мошкарова Л. А., Тельминов О. А. Методы извлечения акустических признаков в задаче распознавания речи рекуррентными нейронными сетями с долгой краткосрочной памятью // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-3(102). — С. 838–841. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.838.841.
3. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 434 с. ISBN 978-5-94836-611-1.
4. Yin S., Sun X., Yu S. and Seo J.-S. High-Throughput In-Memory Computing for Binary Deep Neural Networks With Monolithically Integrated RRAM and 90-nm CMOS // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 67. № 10. P. 4185–4192, Oct. 2020. DOI: 10.1109/TED.2020.3015178.

УДК 538.911 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.894.895

# Влияние отжига на параметры барьеров Шоттки на основе $In_{0.52}Al_{0.48}As$ с различным составом слоев металлизации

## The Effect of Annealing on the Parameters of Schottky Barriers Based on $In_{0.52}Al_{0.48}As$ with Different Compositions of Metallization Layers

**Гензе И. Ю.**
***студент*[1]**
*i.genze@g.nsu.com*

**Аксенов М. С., к. ф.-м. н.**
***научный сотрудник*[2]**
*aksenov@isp.nsc.ru*

**Валишева Н. А., к. х. н.**
***старший научный сотрудник*[2]**
*valisheva@isp.nsc.ru*

*[1] Новосибирский государственный университет*
*630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*
*[2] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*
*630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13*

**Genze I. Y.**
***student*[1]**
*i.genze@g.nsu.ru*

**Aksenov M. S., Ph.D**
***researcher*[2]**
*aksenov@isp.nsc.ru*

**Valisheva N. A., Ph.D**
***senior researcher*[2]**
*valisheva@isp.nsc.ru*

*[1] Novosibirsk State University*
*2 Pirogov St., Novosibirsk, 630090*
*[2] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*
*13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*

Изучено влияние отжига в диапазоне 300–450 °C на Au/Ti/n-InAlAs и Au/Pt/Ti/n-InAlAs барьеры Шоттки. Установлены условия отжига, позволяющие существенно увеличить значение высоты барьера ($\varphi_b$) относительно начального. Определены условия деградации параметров и разрушения барьеров Шоттки, связанных с диффузией Au.
**Ключевые слова:** InAlAs; Ti; Pt; Au; барьер Шоттки; ВАХ; коэффициент идеальности; высота барьера.

The effect of annealing in the range of 300–450 °C on Au/Ti/n-InAlAs and Au/Pt/Ti/n-InAlAs Schottky barriers has been studied. The conditions of annealing have been

established, which makes it possible to significantly increase the value of the barrier height ($\varphi_b$) relative to the initial one. The conditions for degradation of parameters and destruction of Schottky barriers associated with Au diffusion have been determined.
**Keywords:** InAlAs; Ti; Pt; Au; Schottky barrier; I-V characteristic; ideality factor; barrier height.

***Введение***

$In_{0.52}Al_{0.48}As$ используется при создании микроволновых фотодетекторов с широким оптическим диапазоном и транзисторов с барьерами Шоттки (БШ). Свойства применяемых Ti/InAlAs БШ определяют ряд рабочих характеристик данных приборов, а также их стабильность и надежность.

Отжиг является традиционным способом изменения параметров БШ. Однако отжиг Ti/InAlAs БШ изучен недостаточно. Анализы отжига, проведенные в работах [1, 2], демонстрируют противоречивые результаты, что препятствует формулированию однозначных выводов о его влиянии на параметры Ti/InAlAs БШ.

***Экспериментальные результаты***

В данной работе путем анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) было изучено влияние времени отжига в формовочном газе при температурах 300–450 °C на параметры ($\varphi_b$, коэффициент идеальности $n$) БШ на основе InAlAs со слоями металлизации Au/Ti (20 нм), Au/Ti (80 нм) и Au/Pt (30 нм) / Ti (80 нм). Подробное описание этапов формирования БШ представлено в работе [3].

Показано, что до отжига большая часть барьеров Шоттки характеризовалась типичными для контактов Ti/InAlAs параметрами: высотой барьера $\varphi_b$ и коэффициентом идеальности $n$ со значениями в диапазонах 0,69–0,7 эВ и 1,08–1,1 соответственно. При этом было обнаружено, что ряд образцов имел изначально низкую $\varphi_b$ (0,58 эВ).

Установлено, что краткосрочный (5 минут) отжиг структур с низкой высотой барьера при температурах 300 и 350 °C позволяет существенно повысить величину $\varphi_b$ с 0,58 до 0,64 и 0,69 эВ соответственно при сохраняющемся $n$, равном 1,1.

Показано, что отжиг структур с изначально высокой $\varphi_b$ (0,68–0,7 эВ) при температурах 300–350 °C суммарным временем до 20 минут слабо влияет на параметры барьеров Шоттки. При росте температуры до 400 °C отжиг длительностью 10 минут приводит к увеличению значений как $\varphi_b$ до 0,73 эВ, так и $n$ до 1,3.

Показано, что добавление слоя Pt принципиально не изменяет поведение параметров барьера, но при этом позволяет увеличить время отжига при 400 °C до деградации, связанной с диффузией Au к границе раздела, минимум в два раза. Краткосрочный отжиг при температуре 450 °C для всех исследуемых барьеров Шоттки, независимо от состава слоев металлизации, приводил к разрушению барьера.

***Литература***

1. Lien Y. C. et al. Thermal stability of Ti/ Pt/ Cu Schottky contact on InAlAs layer // Applied physics letters, 2006. V. 89. № 8. P. 083517.
2. Wang L. et al. Schottky barrier characteristics and interfacial reactions of Ti on n-$In_{0.52}Al_{0.48}As$ // Applied physics letters, 2007. V. 91. № 2. P. 022110.
3. Chistokhin I. B. et al. Barrier characteristics and interface properties of Au/Ti/n-InAlAs Schottky contacts // Mater. Sci. Semicond. Process. 2018. Vol. 74. P. 193–198.

УДК 621.373.826 + 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.896.897

# Применение лазерных систем в вопросах обработки материалов микроэлектронной промышленности

## Using Laser Systems in Materials Processing of the Microelectronic Industry

**Васильев О. С., к. т. н.**
***руководитель отдела***
*ООО «Лазерный центр»*
*г. Санкт-Петербург*
*AppLab@newlaser.ru*

**Vasiliev O. S., Ph.D**
***Head of Department***
*Laser Center Ltd*
*St. Petersburg*
*AppLab@newlaser.ru*

В работе представлены некоторые технологические подходы и оборудование для обработки материалов микроэлектронной промышленности. Обозначены преимущества маломощных лазерных систем в данной производственной отрасли. Представлены конкретные примеры лазерной маркировки, гравировки, резки, сварки, формирования микротопологий и прочие процессы обработки различных металлов.
**Ключевые слова:** лазер; лазерная система; лазерное излучение; микрообработка.

The paper presents some technological approaches and equipment for processing materials in the microelectronic industry. The advantages of low-power laser systems in the manufacturing industry have been outlined. Specific examples of laser marking, engraving, cutting, welding, formation of micro-topologies and other processes of processing various metals have been presented.
**Keywords:** laser; laser system; laser radiation; micromachining.

### *Введение*

Лазерные системы и технологии широко применяются в различных отраслях промышленности. Производство микроэлектроники и различных электронных компонентов не является исключением. Целью данной работы является определение принципиальных возможностей лазерных систем при решении различных производственных задач соответствующей отрасли.

### *Взаимодействие лазерного излучения с веществом*

Известно, что различные материалы имеют разные показатели поглощения электромагнитной волны, в частности излучения лазера [1]. Опираясь на литературные источники, можно определить длину волны лазерного излучения, наиболее оптимального для обработки материалов радиоэлектронной промышленности, таких как поликор, лейкосапфир, ситалл, различные типы керамики, кремний, феррит, арсенид галлия, различные металлы, сплавы, полупроводники и т. д. [2].

Однако показатель поглощения не всегда является основным параметром, гарантирующим эффективный процесс обработки. Немаловажную роль играет технологический подход, применяемый для обработки материалов. Одновременно и лазерная система, включающая в себя генератор электромагнитной волны и систему наведения луча, должна обеспечивать необходимые степени свободы не только фокусировки излучения, но и стабильность оптических и энергетических параметров.

***Результаты***

С использованием лазерной установки с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, длительностью импульсов $\tau = 1–100$ нс, частотой генерации $f = 2–1000$ кГц, в комплексе которой находится система пространственного отклонения луча и телецентрический объектив, был разработан ряд технологических процессов, таких как резка, скрайбирование, перфорация, деметаллизация, формирование микро- и мезотопологических структур в материалах микроэлектронной промышленности [3]. Определены принципиальные возможности решения производственных задач при обработке обозначенных выше материалов и достигнуты результаты, удовлетворяющие современным требованиям производства. Разработанные технологии в совокупности с используемой лазерной системой могут служить альтернативным решением для существующих производственных процессов, а в ряде случаев являются более эффективными как в технологическом плане, так и в экономическом.

***Литература***

1. Вейко В. П. Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлетронике. Опорный конспект лекций. — Санкт-Петербург, изд-во ИТМО, 2011.
2. Немцев В. Н. и др. Перспективные материалы для микроэлектроники // Перспективные материалы и технологии, материалы международного симпозиума. В 2 частях. — Минск, 2017.
3. Байнева И. И. Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники: Учебное пособие. — Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Саранск, 2018.

УДК 537.312.7 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.898.899

# Влияние квантового транспорта носителей заряда на высокочастотную электропроводность полупроводникового нанослоя

## Influence of Quantum Transport of Charge Carriers on the High Frequency Conductivity of a Semiconductor Nanolayer

**Савенко О. В., к. ф.-м. н.**
***научный сотрудник***
*o.savenko@uniyar.ac.ru*

**Кузнецова И. А., д. ф.-м. н.**
***зав. кафедрой микроэлектроники и общей физики***
*kuz@uniyar.ac.ru*

*ЯрГУ им. П. Г. Демидова*
*г. Ярославль*

**Savenko O. V., Ph.D**
***researcher***[1]
*o.savenko@uniyar.ac.ru*

**Kuznetsova I. A., Sc.D**
***head of Microelectronics and General Physics department***
*kuz@uniyar.ac.ru*

*P. G. Demidov YarSU*
*Yaroslavl*

Построена теоретическая модель электропроводности полупроводникового нанослоя в переменном электрическом поле с учетом квантовой теории процессов переноса. Поверхностное рассеяние носителей заряда учитывается через граничные условия Соффера. Получено аналитическое выражение для модуля и фазы интегральной проводимости как функции безразмерных параметров: толщины слоя, частоты электрического поля, химического потенциала, параметров шероховатости поверхностей. Проведено сравнение полученных результатов для случаев вырожденного и невырожденного электронного газа и с известными экспериментальными данными.
**Ключевые слова:** тонкий слой; уравнение Лиувилля; матрица плотности; длина волны де Бройля; модель Соффера; параметр шероховатости; электропроводность.

A theoretical model of the ac-conductivity of a semiconductor nanolayer has been constructed in view of the quantum theory of transport phenomena. Surface scattering of charge carriers has been considered through the Soffer boundary conditions. An analytical expression for the integral conductivity module and phase has been obtained as a function of dimensionless parameters: layer thickness, electrical field frequency, chemical potential, surface roughness parameters. The results obtained have been compared for the cases of a degenerate and non-degenerate electron gas and with known experimental data.

**Keywords:** thin layer; Liouville equation; density matrix; de Broglie wavelength; Soffer model; roughness parameter; conductivity.

***Введение***

Проводящие нанослои широко применяются в наноэлектронике, солнечной энергетике. Минимальный характерный размер нанослоев составляет порядка нанометров. Для теоретического описания таких объектов необходимо использовать квантовую теорию явлений переноса, заключающуюся в нахождении матрицы плотности носителей заряда решением уравнения Лиувилля. Предполагается упругое рассеяние носителей заряда и малое отклонение системы от состояния равновесия. В этом случае объемное рассеяние можно описать через время релаксации. Поверхностное рассеяние учитывается с помощью граничных условий Соффера, полученных в результате решения квантово-механической задачи о взаимодействии волны де Бройля с поверхностью образца [1]. Найденные компоненты матрицы плотности позволяют рассчитать плотность тока в слое и интегральную проводимость.

***Основные результаты***

Получено аналитическое выражение для интегральной проводимости как функции толщины слоя, частоты электрического поля, химического потенциала и параметров шероховатости поверхностей. Рассмотрены предельные случаи вырожденного и невырожденного электронного газа. Показано, что в случае вырожденного электронного газа зависимость модуля проводимости от толщины ведет себя осциллирующим образом. Период осцилляций равен половине длины волны де Бройля носителей заряда. В случае невырожденного электронного газа осцилляций не наблюдается. С увеличением толщины и параметров шероховатости осцилляции зависимостей проводимости от толщины становятся менее ярко выраженными. Обнаружены осцилляции зависимостей аргумента проводимости от частоты электрического поля. Установлено, что в случае одинаковых параметров шероховатости верхней и нижней поверхности период осцилляций частотных зависимостей аргумента проводимости в два раза больше, чем при разных параметрах шероховатости. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными для пленки селенида висмута [2]. В работе [2] показано, что при толщине, сравнимой или меньше длины волны де Бройля носителей заряда, проводимость пленки резко убывает с уменьшением толщины. Теоретический расчет с учетом квантования энергетического спектра носителей заряда объясняет данный эффект уменьшением числа разрешенных энергетических состояний, на которые могут попадать носители заряда из валентной зоны в зону проводимости.

***Литература***

1. Soffer S. B. Statistical Model for the Size Effect in Electrical Conduction // J. Appl. Phys., 1967. V. 38. P. 1710–1715.
2. Menshikova S. I., Rogacheva E. I., Sipatov A. Yu., Fedorov A. G. Dependence of electrical conductivity on Bi2Se3 thin film thickness // Functional Materials, 2017. V. 24. № 4. P. 555–558.

УДК 538.91 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.900.902

# Влияние стадий гетерогенного роста на базовые характеристики слоев

## Influence of Heterogeneous Growth Stages on the Basic Characteristics of Layers

**Евдокимов В. Л.**
***н. с.***
*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
*vevdokimov@niime.ru*

**Evdokimov V. L.**
***researcher***
*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
*vevdokimov@niime.ru*

Рассмотрена молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы для условий гетерогенного роста. Модель включает схему стадий процесса и выражения для расчета их скоростей и учитывает диффузию, адсорбцию и химическое превращение реагентов с образованием основного и побочного продуктов. Сформулированы и количественно оценены показатели конформности и примесности слоев.
**Ключевые слова:** газофазное осаждение; гетерогенный рост; моделирование процесса; конформность; примесность.

The paper considers a molecular kinetic model of the deposition of layers from the gas phase for heterogeneous growth conditions. The model includes a diagram of the process stages and expressions for calculating their velocities and takes into account the diffusion, adsorption and chemical transformation of reagents with the formation of the main and by-products. The indicators of the conformality and the incorporated by-products of layers have been formulated and quantified.
**Keywords:** gas-phase deposition; heterogeneous growth; process modeling; conformality; incorporated byproducts.

### *Введение*

При изготовлении микросхем широкое применение находят процессы газофазного осаждения слоев $SiO_2$, $Si_3N_4$, Si-поли, W, TiN и других, формируемых способом термической активации реагентов [1–3]. Наиболее совершенные слои формируются в условиях гетерогенного роста, когда химическая реакция в пограничном газовом слое подавлена. Реализация режима гетерогенного роста в существенной мере определяется термохимическими характеристиками исходных реагентов [4]. Для этих условий актуальна разработка соответствующей кинетической схемы и аналитической модели, позволяющих прояснить внутренние механизмы процесса формирования слоев и прогнозировать их базовые характеристики.

***Кинетическая схема процесса гетерогенного осаждения***

В соответствии с предлагаемой кинетической схемой (рис. 1) процесс гетерогенного роста включает в себя диффузию реагента $G_v$ через пограничный слой δ (скорость $r_g$), физическую адсорбцию ($r_{ga}$) приповерхностного реагента $G_s$ с формированием концентрации молекул $G_a$ на центрах адсорбции, а также мобильных молекул $G_m$, диффундирующих по поверхности и находящихся с первыми в соотношении к. Адсорбированные на центрах и мобильные молекулы химически превращаются ($r_{saa}$ и $r_{sm}$) в основной продукт $S$ с образованием ($r_i$) побочного продукта $I_r$. В экзотермическом процессе летучие молекулы побочного продукта активно десорбируются ($r_{id}$) и при концентрации $I_s$ у поверхности часть их равновесно реадсорбируется ($r_{ia}$). Другая часть диффундирует ($r_{di}$) наружу пограничного слоя, где их концентрация $I_v$.

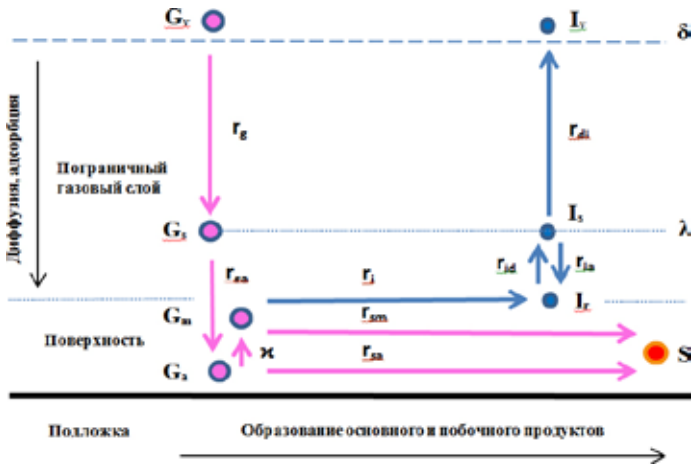



**Рис. 1.** Кинетическая схема процесса осаждения в гетерогенном режиме

Сформулированы следующие выражения для скоростей стадий:

$$r_g = \frac{(G_v - G_s)D_g}{\delta},$$

$$r_{ga} = \frac{G_s v k_g}{6} e^{\frac{Q}{RT}},$$

$$r_{sa} = G_a \left(\frac{v_s}{2d}\right) e^{\frac{-E}{RT}},$$

$$r_{sm} = \frac{r_{sa}}{к},$$

$$r_{ia} = \frac{\frac{c}{b}(r_{sa} + r_{sm})vk_i e_{ia}}{\left(\frac{D}{\delta} + vk_i e_{ia}\right)},$$

где $D$ — коэффициент диффузии реагента и побочного продукта, $v$ — тепловая скорость молекул в газе, $v_s$ — скорость молекул газа на поверхности, $k_g$ — коэффициент прилипания, $b$, $c$ — стехиометрические коэффициенты реакции образования основного и побочного продуктов, $Q$ — теплота адсорбции реагента, $Q_i$ — теплота адсорбции побочного продукта, $E$ — энергия активации химической реакции, $d$ — диаметр молекул реагента, $T$ — температура подложки, $R$ — универсальная газовая постоянная, $e_{ia} = e^{Qi-\Delta Hi}$, $\Delta H_i$ — удельный экзотермический эффект образования побочного продукта.

Соотношение скоростей $r_{sa}$ и $r_{sm}$ отражает способность процесса к сглаживанию собственного микрорельефа слоя и влияет на конформность на топологическом рельефе, а отношение скорости $r_{ia}$ к сумме указанных скоростей определяет степень примесности по побочному продукту. Оценка указанных характеристик на примере осаждения оксида кремния дает соответственные значения, 57–82 % и $5{,}8 \cdot 10^{-5}$–$4{,}3 \cdot 10^{-3}$ % в зависимости от термохимических свойств реагентов.

***Заключение***

Оценка скоростей стадий и показателей качества слоев показывает удовлетворительное соответствие модели наблюдаемым закономерностям роста и характеристикам слоев, осаждаемых в гетерогенном режиме. Модель может быть применена для анализа процессов осаждения и прогнозирования базовых характеристик слоев, формируемых из реагентов с различными термохимическими свойствами.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — С. 123–180.
2. Pierson Hugh O. Handbook of chemical vapor deposition // Noes Publications. Westwood, NJ, USA, 1992. P. 227–242.
3. Васильев В. Н., Репинский С. М. Осаждение диэлектрических слоев из газовой фазы // Успехи химии, 2005, 74. — С. 452–483.
4. Евдокимов В. Молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника, 2017. — Вып. 4 (168). — С. 42–55.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.903.904

# Вероятностная оценка сбоеустойчивости комбинационных логических схем

## Probabilistic Evaluation of Combinational Logic Circuits Reliability

**Желудков Н. В.**
***инженер[1], аспирант[1]***
*nvgel@cs.niisi.ras.ru*

**Петров К. А., к. т. н.**
***старший научный сотрудник***
*petrovk@cs.niisi.ras.ru*

*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН*
*117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1*

**Zheludkov N. V.**
***engineer, postgraduate***
*nvgel@cs.niisi.ras.ru*

**Petrov K. A., Ph.D**
***senior research associate***
*petrovk@cs.niisi.ras.ru*

*SRISA RAS*
*bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218*

В работе представлен анализ вероятностных методов оценки сбоеустойчивости комбинационных логических схем. Реализован и интегрирован в маршрут проектирования СБИС метод «вероятностной модели сбоя вентилей». Приведена оценка сбоеустойчивости различных реализаций нециклического кодера-декодера с использованием данного метода.
**Ключевые слова:** СБИС; сбоеустойчивость; маскирование сбоев; вероятностные методы оценки; логический синтез.

The paper presents an analysis of probabilistic methods for evaluating the reliability of combinational logic circuits. The method of “probabilistic gate-level fault models” has been implemented and integrated into the VLSI design flow. The results of the reliability evaluation are given on the example of non-cyclic encoder-decoders.
**Keywords:** VLSI; reliability; faults masking; probabilistic evaluation methods; logic synthesis.

### *Введение*

Вероятностные методы позволяют оценить сбоеустойчивость СБИС при проектировании. Основной причиной использования вероятностных методов для оценки сбоеустойчивости является их меньшая вычислительная сложность по сравнению как с точным аналитическим решением, сложность которого экспоненциально зависит от количества входов схемы и ее элементов [1], так и с моделированием топологии [2]. К недостаткам вероятностных методов можно отнести высокую относительно других рассмотренных методов погрешность результата. Это делает вероятностные методы актуальными для решения задач быстрой

оценки относительной сбоеустойчивости разных вариантов подобных между собой комбинационных логических схем.

Проведен анализ следующих вероятностных методов: «сквозной метод» (single-pass reliability analysis [3]) и метод «вероятностной модели сбоя вентилей» (probabilistic gate-level fault models [4]). По результатам анализа для оценки сбоеустойчивости комбинационных схем был выбран метод «вероятностной модели сбоя вентилей».

***Реализация метода и результаты оценки***

В основе метода вероятностной модели сбоя вентилей при рассмотрении комбинационной схемы с несколькими входами и множеством элементов используются операции для описания различных типов соединения ячеек (параллельное, последовательное и более сложные), которые позволяют получить вероятностную матрицу перехода (probabilistic transfer matrix [5]) для всей комбинационной схемы. Принцип, лежащий в основе этого метода, позволяет легко реализовать его в рамках стандартного маршрута проектирования СБИС.

Метод вероятностной модели сбоя вентилей был усовершенствован и реализован в качестве программного обеспечения на языке Tcl с использованием команд САПР Genus Cadence. Также был предложен вариант метода, используемый при сравнении нескольких реализаций одной схемы. Предложенный вариант метода был применен для оценки сбоеустойчивости нескольких реализаций нециклического кодер-декодера, полученных на этапе синтеза нетлиста из поведенческой модели по проектным нормам 65 нм.

Результаты оценки сбоеустойчивости показали, что наибольшей сбоеустойчивостью (0,57 и 0,56 условных единиц соответственно) обладают варианты синтеза без элементов XOR и с ограничением на выходную нагрузку (fanout).

***Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № 121031700196-7.***

***Литература***

1. Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Соловьев Р. А., Тельпухова Н. В. Исследование вероятностных методов оценки логической уязвимости комбинационных схем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2016. — № 4. — С. 121–126.
2. Balbekov A. O., M.S.Gorbunov, G.I.Zebrev, Circuit-level layout-aware modeling of single-event effects in 65-nm CMOS ICs // IEEE Transactions on computer-aided design of IC and systems. Vol. 65. № 8, Aug. 2018. P. 1914–1919.
3. Mihir R. Choudhury, Kartik Mohanram, Reliability Analysis of Logic Circuits // IEEE Transactions on computer-aided design of IC and systems. Vol. 28. № 3. Mar. 2009. P. 392–405.
4. Patel K. N., Markov I. L. and Hayes J. P. Evaluating circuit reliability under probabilistic gate-level fault models // Proceedings of the International Workshop on Logic and Synthesis, 2003. P. 59–64.
5. Krishnaswamy S., Markov I. L., Hayes J. P. Design, analysis and test of logic circuits under uncertainty. Springer, 2013.

***The work was carried out within the framework of the state assignment of SRISA RAS № 121031700196-7.***

УДК 004.931 + 004.932 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.905.906

# Методы позиционирования лазерных процессов на объекте обработки

## Methods of Positioning Laser Processes on the Processing Object

**Афонюшкин А. А.**
***ведущий научный сотрудник***
*ООО «Лазерный центр»*
*г. Санкт-Петербург*
*aode@mail.ru*

**Afoniushkin A. A.**
***Lead researcher***
*Laser Center Ltd*
*St. Petersburg*
*aode@mail.ru*

В работе приведено несколько методов детектирования объектов для позиционирования лазерной обработки, показано, что алгоритмы машинного зрения могут существенно оптимизировать технические процессы в лазерном приборостроении.
**Ключевые слова:** лазерные системы; лазерная обработка; машинное зрение; детектирование объектов.

The paper presents several methods of object detection for laser processing positioning, and shows that machine vision algorithms can significantly optimize technical processes in laser instrumentation.
**Keywords:** laser systems; laser processing; machine vision; object detection.

### *Введение*

Точное позиционирование процессов лазерной обработки является одной из ключевых задач современного лазерного приборостроения. В настоящей работе продемонстрированы подходы, применяемые для нахождения объектов и позиционирования лазерной обработки на них, в том числе для задач микроэлектроники.

### *Методы позиционирования лазерного излучения*

Самым распространенным и простым методом позиционирования лазерных процессов является визуальный: оператор при помощи камеры прицеливается в объект обработки.

Промежуточным звеном является поиск мишени при помощи алгоритмов машинного зрения, например сопоставления с шаблоном.

Для задач лазерной обработки при наличии широкой номенклатуры объектов не всегда подходят методы, требующие обучения нейронной сети, так как создание датасета для каждого нового объекта трудоемко и экономически нецелесообразно. Для таких задач мы обычно предлагаем подходы, основанные на извлечении признаков объекта (особых точек) из шаблона и детектировании их на изображении — SIFT, SURF, BRISK, ORB [1] — или их более современные аналоги: AffNet [2] и Hardnet++ [3]. Эти подходы демонстрируют хорошую производительность для

задач распознавания и детектирования положения объекта, но каждый в отдельности имеет свои недостатки.

***Результаты***

Продемонстрированы подходы для детектирования объектов и позиционирования процессов лазерной обработки, использующиеся в современном лазерном приборостроении. Данные подходы могут значительно оптимизировать существующие технические процессы и заметно повысить производительность и точность, минимизировав человеческий фактор.

***Литература***

1. Saleem Khan Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK // IEEE Int. Conf. on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, March 2018.
2. Mishkin D., Radenovic F., Matas J. Repeatability Is Not Enough: Learning Affine Regions via Discriminability // European Conference on Computer Vision, 2018.
3. Mishchuk A., Mishkin D., Radenovic F., Matas J. Working Hard to Know Your Neighbor's Margins: Local Descriptor Learning Loss. In NIPS, 2017.

УДК 537.611.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.907.909

# Управление динамикой особой точки в системе связанных магнонных волноводов со сбалансированными затуханием и усилением

## Dynamics of an Excetptional Point in a System of Two Coupled Magnonic Waveguides

**Темная О. С.**
***аспирант***
*ostemnaya@gmail.com*

**Калябин Д. В., к. ф.-м. н.**
***старший научный сотрудник***
*dmitry.kalyabin@phystech.edu*

**Никитов С. А., чл.-корр. РАН, д. ф.-м. н.**
*директор*
*nikitov@cplire.ru*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН*
*125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7*

**Temnaya O. S.**
***postgraduate***
*ostemnaya@gmail.com*

**Kalyabin D. V., Ph.D**
***researcher***
*dmitry.kalyabin@phystech.edu*

**Nikitov S. A., corresponding member of RAS**
***director***
*nikitov@cplire.ru*

*IRE RAS*
*Moscow*

В работе предложен метод контроля особой точки в дипольно связанных магнонных планарных волноводах посредством изменения эффективного затухания одного из волноводов.
**Ключевые слова:** магнонные волноводы; особые точки; управление затуханием.

The paper presents a method of controlling an exceptional point in magnonic systems with dipolar coupling. We have demonstrated this effect by varying effective damping of one waveguide in the system.
**Keywords:** magnonic waveguides; exceptional points; damping control.

### *Введение*

Управление затуханием позволяет локально менять свойства систем, состоящих из связанных магнонных структур [1]. Целью работы является нахождение закона изменения особых точек перехода нормальных мод в собственные при

варьировании волновых чисел возбуждаемых волн и эффективной константы затухания в одном из магнонных волноводов.

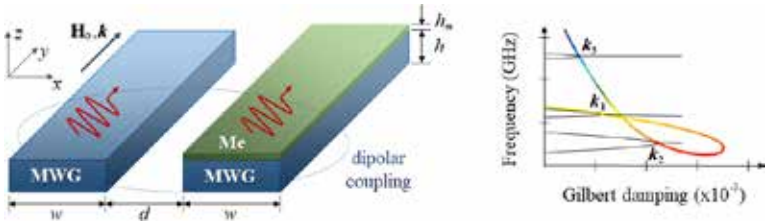
***Особые точки в дисперсионных характеристиках планарных магнонных структур***

Магнонные структуры вызывают значительный интерес в последние годы благодаря возможности создавать на их основе новые элементы функциональной электроники, такие как модовые селекторы и направленные ответвители [2, 3]. В спектре рассматриваемой системы, состоящей из двух связанных магнонных волноводов, существует две нормальные моды — симметричная и асимметричная [2]. При изменении величины эффективного затухания в одном из волноводов в дисперсионной характеристике можно наблюдать т. н. *особую точку*, при переходе через которую нормальные моды связанной системы преобразуются в собственные частоты невзаимодействующих волноводов.

Ранее динамика особых точек изучалась в гетероструктурах, состоящих из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонким слоем тяжелого металла [1], тогда как более простые в реализации [4] планарные связанные структуры исследованы не были.

***Результаты работы***

В работе показана эволюция особой точки в системе из двух связанных магнонных нановолноводов (рис. 1*а*) при возбуждении обратных объемных спиновых волн. Особая точка меняла положение на дисперсионной характеристике благодаря изменению волнового числа и эффективной константы затухания (рис. 1*б*). Показано, что при увеличении волнового числа положение особой точки описывает петлю, связанную с изменением влияния дипольного и обменного взаимодействий.




*а* *б*

**Рис. 1.** Система из двух связанных магнонных волноводов (*а*); зависимость положения особой точки от волнового числа, $k_1 = 1$ рад/нм, $k_2 = 10$ рад/нм, $k_3 = 30$ рад/нм (*б*)

***Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-29-03015, 18-29-27018, 18-57-76001.***

***Литература***

1. Wang X., Guo G., Berakdar J. Enhanced Sensitivity at Magnetic High-Order Exceptional Points and Topological Energy Transfer in Magnonic Planar Waveguides // Physical Review Applied, 2021. V. 15. № 3. P. 034050.

2. Wang Q. et al. Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler // Science advances, 2018. V. 4. № 1. P. e1701517.
3. Wang Q. et al. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders // Nature Electronics, 2020. V. 3. № 12. P. 765–774.
4. Sadovnikov A. V. et al. Nonlinear Spin Wave Effects in the System of Lateral Magnonic Structures // JETP Letters, 2018. V. 107. № 1.

***We acknowledge the support from the grant of Russian Foundation for Basic Research (Grant № 19-29-03015, 18-29-27018, 18-57-76001).***

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.910.911

# Методы повышения эффективности процесса формирования фотошаблонов в рамках программного комплекса mask-flow

## Methods for Increasing the MDP Efficiency Within the Mask-Flow Software Package

**Колобов А. В.**
***инженер-конструктор 1-й кат.***
*akolobov@niime.ru*

**Медведев К. А.**
***инженер-программист 1-й кат.***
*kmedvedev@niime.ru*

*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Kolobov A. V.**
***design engineer***
*akolobov@niime.ru*

**Medvedev K. A.**
***software engineer***
*kmedvedev@niime.ru*

*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В работе описаны основные проблемы, связанные с временем выполнения наиболее длительных этапов подготовки управляющей информации для производства фотошаблонов, приведены методы решения этих проблем, а также результаты применения данных методов на примере этапа «генерация OPC» в рамках программного комплекса mask-flow.
**Ключевые слова:** оптимизация; python; САПР.

The paper describes main problems associated with the execution time of the longest MDP (mask data preparation) stages, provides methods for solving these problems, as well as the results of applying these methods using the example of the “OPC generation” stage within the mask-flow software package.
**Keywords:** optimization; python; CAD.

### *Введение*

Программный комплекс mask-flow представляет собой набор инструментов, позволяющих в автоматическом или полуавтоматическом режиме выполнить все этапы маршрута подготовки управляющей информации (УИ) для производства фотошаблонов (ФШ) [1]. Наиболее времязатратной частью маршрута является процесс формирования ФШ. В работе описаны методы, позволяющие сократить временные затраты при выполнении этой части маршрута.

***Оптимизация процесса формирования ФШ***

Стандартный маршрут подготовки УИ включает в себя следующие этапы, связанные непосредственно с формированием ФШ в электронном виде [2]:

- сборка топологического кадра изображения;
- проведение необходимых коррекций на кадре изображения;
- сборка ФШ.

К основным недостаткам данного маршрута можно отнести:

- низкий уровень декомпозиции этапов;
- большие временные затраты при выполнении ОРС (коррекция эффектов оптической близости) на кадре изображения.

В качестве одной из мер оптимизации использовалась переработка структуры этапов подготовки УИ, связанных с формированием ФШ:

- отказ от сборки топологического кадра изображения;
- генерация ОРС послойно на каждый входной топологический файл;
- сборка ФШ из отдельных составляющих на основе данных из эскиза.

Изменения, внедренные в структуру маршрута, позволили также применить меры оптимизации непосредственно к этапу «генерация ОРС», который в большинстве случаев является наиболее длительным этапом процесса формирования ФШ:

- использование Python в качестве основного средства разработки;
- внедрение штатных средств САПР для распределения операций по вычислительным серверам или рабочим станциям, оптимизация подключения к удаленным хостам;
- реализация параллельного выполнения операций этапа (threading);
- оптимизация расчета «общих» данных (контрольные суммы, габариты топологий, ячейки верхнего уровня).

**Результаты**

Применение описанного комплекса мер оптимизации позволило значительно сократить время, затрачиваемое на формирование ФШ в электронном виде. За счет этого общие временные затраты на подготовку УИ для семейств технологий уровня 90 нм сократились на 40–50 %, для семейств технологий 180 нм — на 20–30 %.

***Литература***

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2 томах. — М., 2013.
2. Иванов В. В., Медведев К. А., Тельминов О. А. Программный комплекс MaskFlow для автоматизации процесса подготовки управляющей информации для изготовления фотошаблонов // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — №4 (172). — С. 68–77.

УДК 621.382.32 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.912.913

# Оценка эффективности применения различных промышленных экстракторов для определения параметров SPICE-моделей субмикронных МОП-транзисторов

## Estimating the Efficiency of Applying Various Industrial Extractors for Determining Spice Models Parameters of Submicron MOSFETs

**Исмаил-Заде М. Р.**
***преподаватель***
*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)*
*123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*
*mismailzade@hse.ru*

**Ismail-Zade M. R.**
***lecturer***
*National Research University "Higher School of Economics" (Moscow Institute of Electronics and Mathematics)*
*34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia*
*mismailzade@hse.ru*

С использованием стандартного маршрута определения параметров SPICE-модели исследовались возможности трех наиболее распространенных коммерческих экстракторов IC-CAP, MBP и BSIMProPlus. Приведены сравнительные оценки эффективности экстракторов на примере расчета ВАХ МОПТ с учетом температуры до +300 °С.
**Ключевые слова:** компактные SPICE-модели; экстракция параметров модели; МОП-транзисторы; SPICE-моделирование.

Using standard SPICE-model parameters extraction procedure, the possibilities of the three most common commercial extractors IC-CAP, MBP, and BSIMProPlus have been investigated. Comparative estimates of the efficiency of extractors are given on the example of calculating MOSFETs I–V characteristic taking into account the temperatures up to +300 °C.
**Keywords:** compact SPICE models; model parameter extraction; MOS transistors; SPICE modeling.

### *Введение*

Компактная SPICE-модель характеризуется совокупностью параметров, позволяющих учесть различные физические эффекты в структуре МОПТ. Значения этих параметров определяются по результатам измерения или приборно-технологического (TCAD) моделирования набора ВАХ и ВФХ.

Традиционным способом определения набора параметров SPICE-моделей тестовых структур является использование коммерческих специализированных пакетов, таких как IC-CAP [1], MBP [2], BSIMProPlus [3]. В данной работе проведена сравнительная оценка эффективности применения перечисленных экстракторов для задач построения масштабируемой SPICE-модели МОПТ в широком диапазоне температуры (до 300 °С).

***Этапы процедуры экстракции параметров SPICE-модели***

В каждый из трех экстракторов заложен общепринятый стандартный подход [4] к определению параметров spice-моделей, который заключается в следующем: 1) в качестве входных данных используется набор стандартных ВАХ транзисторов различного размера; 2) сама процедура определения параметров представляет собой совокупность отдельных этапов, на каждом из которых задействуется подгруппа параметров и отдельные участки ВАХ отдельной группы транзисторов (наибольший, с различной длиной и одинаковой шириной и т. д.); 3) некоторое количество этапов процедуры представляет собой задачи прямого вычисления, но большая часть этапов является задачами математического программирования («оптимизации»); 4) качество выполнения процедуры определения параметров модели определяет итоговую погрешность модели, которую обычно оценивают по степени соответствия смоделированных характеристик экспериментальным характеристикам МОПТ; 5) численным показателем точности совпадения является величина ошибки совпадения, которая в большинстве случаев вычисляется в форме среднеквадратического отклонения (СКО) [5].

***Результаты***

С использованием указанных экстракторов были определены SPICE-параметры модели BSIM4 для набора 0,18-мкм КНИ *n*-МОПТ с размерами длины и ширины канала от $L_{min}/W_{min}$ = 0,18/0,7 мкм до $L_{max}/W_{max}$ = 10/10 мкм при различных значениях температуры от комнатной до 300 °C.

В табл. 1 представлено сравнение затрат времени на экстракцию параметров, количество используемых параметров и максимальной погрешности моделирования ВАХ.

**Таблица 1.** Сравнительные оценки параметров эффективности экстракторов

| | ***IC-CAP*** | ***MBP*** | ***BsimProPlus*** |
|---|---|---|---|
| Число задействованных параметров модели | 35 | 46 | 42 |
| Время экстрагирования, мин | 30 | 15 | 5 |
| Максимальная погрешность сток-затворной ВАХ, % | 24,1 | 13,8 | 28,5 |

***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00898 А) и совместного российско-китайского гранта (грант № 20-57-53004).***

***Литература***

1. IC-CAP Users' Manual, Keysight Technologies.
2. MBP Users' Manual, Keysight Technologies.
3. BSIMProPlus Users' Manual, ProPlus Design Solutions, Inc.
4. Xi X. et al. BSIM4.3.0 MOSFET Model. Berkeley, CA: Dept. Elect. Eng. Comput. Sci., Univ. California, 2003.
5. Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 408 с.

***This work was implemented in the framework of the Russian Foundation for Basic Research (grant 18-07-00898 A), and by RFBR and NSFC according to the research project 20-57-53004.***

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.914.916

# Принципы автоматизации маршрутов проектирования фотошаблонов

## Principles of Mask Data Preparation Flow Automation

**Медведев К. А.**
*инженер-программист*
*kmedvedev@niime.ru*

**Колобов А. В.**
*инженер-конструктор*
*akolobov@niime.ru*

**Иванов В. В.**
*зам. начальника отдела*
*vlaivanov@niime.ru*

*АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Medvedev K. A.**
***software engineer***
*kmedvedev@niime.ru*

**Kolobov A. V.**
***design engineer***
*akolobov@niime.ru*

**Ivanov V. V.**
***deputy head of department***
*vlaivanov@niime.ru*

*Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

В работе сформулированы основные принципы автоматизации маршрутов проектирования фотошаблонов и продемонстрировано их применение на примере интеграции маршрутов 180 и 90 нм в рамках единого программного комплекса.
**Ключевые слова:** проектирование фотошаблонов; автоматизация; MDP; mask-flow.

The paper describes the main principles of mask data preparation flow automation and shows their implementation for the integration of 180 and 90 nm flows within a single software package.
**Keywords:** photomask design; automation; MDP; mask-flow.

### *Введение*

При освоении новых технологических уровней микроэлектронного производства все большую актуальность приобретает задача автоматизации маршрутов проектирования фотошаблонов (ФШ). Степень автоматизации напрямую влияет

на уровень эффективности и надежности процесса, что, в свою очередь, отражается на показателе выхода годных изделий [1].

С учетом постоянного усложнения маршрутов проектирования и расширения перечня дополнительных требований разработка ПО для подготовки управляющей информации (УИ) для изготовления ФШ требует применения комплексного подхода [2]. В работе описаны основные принципы решения подобного рода задач.

***Оптимизация структуры маршрута***

Оптимизация структуры маршрута предусматривает его декомпозицию, направленную на выявление потенциала параллелизации, повышение связности и снижение сцепления операций, разрешение тупиков и вопросов синхронизации этапов. При определении глубины детализации выполняется анализ накладных расходов на организацию вычислений.

***Программная реализация***

Главными требованиями к программной реализации комплекса являются: универсальность (поддержка всех существующих маршрутов), масштабируемость, адаптивность к изменениям конфигурации маршрутов, взаимозаменяемость вычислительных модулей (САПР).

Для удовлетворения заявленных требований целесообразно применять модульную архитектуру с высокой степенью унификации. Отдельные компоненты системы могут быть представлены в виде набора взаимозаменяемых модулей, конкретные экземпляры которых доступны через единый API.

Хорошо зарекомендовал себя подход с использованием концепции MVC (Model-View-Controller), дополненной набором паттернов проектирования [3].

***Оптимизация выполнения этапов проектирования***

На заключительном этапе разработки применяются дополнительные способы оптимизации выполнения этапов маршрута проектирования:

- организация распределенных вычислений с помощью грид-систем;
- асинхронный запуск операций, оптимизация подключения к удаленным вычислительным узлам, организация работы с разделяемыми данными;
- использование штатных средств САПР для обеспечения параллельного выполнения внутри операции и др. [4].

***Результаты***

Описанные принципы позволили разработать гибкую и легко расширяемую платформу, на базе которой может выполняться автоматизация новых техпроцессов.

С помощью разработанного ПО выполнена интеграция маршрутов 180 и 90 нм, что позволило сократить временные затраты на подготовку УИ от 20 % до 50 %. Вместе с тем существенно снизилась вероятность возникновения ошибок, связанных с влиянием человеческого фактора, а также заметно сократились требования к квалификации проектировщика.

***Литература***

1. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазии? // Пути стабилизации экономики России. — Москва: ИНФОРМЭЛЕКТРО, 1999. — С. 162–174.

2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
3. Фримен Эрик и др. Паттерны проектирования. — М.: Питер, 2015. — 656 с.
4. Иванов В. В., Медведев К. А., Тельминов О. А. Программный комплекс MaskFlow для автоматизации процесса подготовки управляющей информации для изготовления фотошаблонов // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 4 (172). — С. 68–77.

УДК 621.383.8 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.917.919

# Датчик оптического и нейтронного излучения на основе электролюминесцентной панели

## Sensor of Optical and Neutron Radiation Based on Electroluminescent Panel

**Урумов В. В.**
***аспирант***
*m.o.r.b.i.u.s@mail.ru*

**Гончаров И. Н., д. т. н.**
***доцент***
*goncharov-scgtu@mail.ru*

*СКГМИ (ГТУ)*
*г. Владикавказ*

**Urumov V. V.**
***postgraduate***
*m.o.r.b.i.u.s@mail.ru*

**Goncharov I. N., Sc.D**
***Associate Professor***
*goncharov-scgtu@mail.ru*

В статье описан способ использования электролюминесцентных панелей не только в виде источника света, но и в виде датчика оптического и нейтронного излучения. Рассмотрен фотодиэлектрический эффект в электролюминесцентных панелях. Получены осциллограммы напряжения и тока электролюминесцентной панели, зависимости величины электрической емкости от уровня внешней освещенности. Изображена структурная схема системы для управления электролюминесцентной панелью.
**Ключевые слова:** электролюминесцентная панель; фотодиэлектрический эффект; электрическая емкость; датчик оптического излучения; генератор прямоугольных импульсов; диэлектрическая проницаемость; титанат бария; освещенность.

The article describes a method of using electroluminescent panels not only as a light source, but also as an optical and neutron radiation sensor. The photodielectric effect in electroluminescent panels has been considered. Oscillograms of the voltage and current of the electroluminescent panel, the dependence of the electric capacity on the level of external illumination have been obtained. A block diagram of a system for controlling an electroluminescent panel has been shown.
**Keywords:** electroluminescent panel; photodielectric effect; electrical capacitance; optical radiation sensor; rectangular pulse generator; dielectric constant; barium titanate; illumination.

### *Введение*

Электролюминесценция в условиях электрического поля высокой напряженности — сложное явление, определяемое многими взаимосвязанными процессами,

протекающими в рабочем слое. Оно лежит в основе работы электролюминесцентных источников света (ЭЛИС).

Как показали исследования, ЭЛИС способны проявлять и фотодиэлектрический эффект, и это свойство, возможно, позволит осуществить разработку и создание на его основе эффективного датчика излучения широкого диапазона спектра. Такие пленки также являются удобным объектом для исследования физики электролюминесценции.

На сегодняшний день можно отметить впервые обнаруженную способность ЭЛИС к фотодиэлектрическому эффекту, что позволит использовать их и как датчики оптического излучения, работа которых основана на изменении величины электроемкости и тока структуры при варьировании внешней освещенности.

***Методика***

Для определения степени влияния внешней засветки на электроемкость структуры были изготовлены ЭЛИС разного формата (площадью 60 и 600 см$^2$). Толщина панели и значение диэлектрической проницаемости в обоих случаях составляли по 75 мкм и 22 единицы. Облучение структуры осуществлялось с использованием светодиодной лампы, ультрафиолетовой лампы с излучаемым спектром 6500 К, расположенной на расстоянии 0,5 м (электрическое питание на панель не подавалось), и источника медленных нейтронов.

***Результаты***

Варьирование яркости внешнего излучения от 0 до 2500 кд/м$^2$ приводит к изменению электроемкости структуры (площадью 60 см$^2$) в среднем на 25 %, при этом прирост по абсолютному значению достигает более 60 нФ. Десятикратное увеличение площади принимающей поверхности вызвало пропорциональный прирост чувствительности:

- повышение яркости внешней засветки $B$ также привело к существенному пропорциональному увеличению электроемкости и тока проводимости структуры $I$, который изменился практически на 40 % с 0,85 до 1,2 мА при соответствующем приросте $B$, достигающей 2000 Кд/м$^2$ (площадь структуры 60 см$^2$, $U = 20$ В, $f = 600$ Гц);
- спектральный диапазон, для которого ЭЛИС непрозрачны. Он находится в интервале от УФ до $\lambda = 520$ нм, соответствующей красной границе;
- сделан вывод о возможности практического применения ЭЛИС в качестве датчиков, их достоинством является широкий спектральный диапазон действия;
- предложена конструкция твердотельного электронно-оптического преобразователя на базе ЭЛИС-датчика с экспертной оценкой его параметров;
- разработана структурная схема системы управления работой ЭЛИС.

***Литература***

1. Гончаров И. Н. и др. Исследование и повышение важнейших характеристик гибких световых панелей // Светотехника, 2017. — № 4. — С. 47–50.
2. Гончаров И. Н. и др. Исследование и повышение долговечности излучения электролюминесцентных панелей // Радиотехника и электроника, 2016. — Т. 61. — № 1. — С. 89–92.

3. Козырев Е. Н. и др. Исследование импеданса электролюминесцентного конденсатора // Устойчивое развитие горных территорий. — Владикавказ, 2014. — Т. 6. — № 4. — С. 115–117.
4. Барышников С. В. Влияние внешних воздействий на диэлектрические и оптические свойства сегнетоэлектриков с различным электронным спектром: дис. — Благовещенск, 1999. — 280 с.
5. Верещагин И. К. Электролюминесценция кристаллов. — М.: Наука, 1974. — 280 с.
6. Бурковский В. Л. Физические явления и эффекты в технических системах: Учебное пособие. — Воронеж, 2007. — 242 с.
7. Гибин И. С., Котенко В. П., Шурман В. Л. Твердотельный преобразователь изображений // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации, 2014. — № 1 (22). — С. 43–51.
8. Каргин Н. И. Физико-химические основы создания электролюминесцирующих структур на основе широкозонных полупроводниковых соединений с высоким уровнем преобразования энергии: дис. — Ставропольский техн. ун-т, 1998. — 395 с.

УДК 621.396.24 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.920.921

# Выбор параметров квазипериодического перемежителя на основе функции, характеризующей разнесение битов в частотно-временной области

## Selecting Parameters of a Quasi-periodic Interleaver Based on a Function Characterizing the Bit Diversity in the Time-Frequency Domain

**Хитева Д. В.**
***инженер-программист***
*geheimberater@yandex.ru*

**Колобков А. В., к. т. н.**
***заместитель начальника центра инновационного развития***
*antvk@mail.ru*

**Горохов К. В.**
***ведущий инженер***
*antvk@mail.ru*

*[1] АО «НПП «Полет»*
*г. Нижний Новгород*

**Khiteva D. V.**
***Software Engineer***
*geheimberater@yandex.ru*

**Kolobkov A. V., Ph.D**
***deputy Head of the Center for Innovative Development***
*antvk@mail.ru*

**Gorokhov K. V.**
***Leading Engineer***
*antvk@mail.ru*

*"RPC "Polyot" JSC*
*Nizhny Novgorod*

В работе исследовано влияние параметров квазипериодического перемежителя на помехоустойчивость OFDM-системы радиосвязи, решена задача оптимизации структуры перемежителя в зависимости от параметров многолучевого нестационарного канала радиосвязи.
**Ключевые слова:** квазипериодический перемежитель; OFDM; сверточный кодер.

The paper investigates the influence of the parameters of a quasi-periodic interleaver on the noise immunity of an OFDM radio communication system. Besides, it solves the problem of optimizing the interleaver structure depending on the parameters of a multi-beam non-stationary communication channel.
**Keywords:** quasi-periodic interleaver; OFDM; convolution coder.

***Введение***

Вследствие многолучевого распространения в линиях связи возникают искажения сигнала, вызывающие групповые ошибки, которые могут быть исправлены при использовании перемежения символов. Целью данной работы является определение оптимальных по критерию максимизации помехоустойчивости параметров перемежителя в зависимости от параметров канала связи.

***Выбор параметров перемежителя***

В работе исследуется квазипериодический перемежитель, для которого зависимость номера канального бита $n_{ch}$ от номера передаваемого бита $n_{tx}$ может быть выражена в явном виде как $n_{ch} = \{(M_r + 1)n_{tx} + C_r\} \bmod L$, где $L$ — длина перемежителя, $x \bmod y$ — остаток от $x/y$, $M_r$ — число, определяющее шаг перестановки, $C_r$ — число, определяющее сдвиг, $M_r \bmod 4 = 0$, $C_r \bmod 2 = 1$, $M_r < L - 1$ и $C_r < L$.

Анализ работы квазипериодического перемежителя был проведен посредством компьютерного моделирования OFDM-системы радиосвязи в рамках модели Ваттерсона для двулучевого канала [1] со статистически эквивалентными в каждом луче релеевскими замираниями. Для исправления ошибок было применено кодирование сверточным кодом [2], декодирование осуществлялось по алгоритму Витерби. Расчеты были проведены для OFDM-сигналов с числом поднесущих 140, 70 и 35, интервалами между лучами 1–16 отсчетов при манипуляции 2PSK, 4PSK для замираний от 0,01 до 0,3, выраженных в относительных единицах $F_dT$, где $F_d$ — уширение Доплера, $T$ — длительность OFDM-символа.

По результатам моделирования была установлена нерегулярность зависимости вероятности битовой ошибки $P_b$ от параметра $M_r$. Для определения $M_r$ было предложено использовать функцию $D_{i,j} = \min_{i,j} \sqrt{d_{i,j}^{(t)2} + d_{i,j}^{(f)2} + d_{i,j}^{(c)2}}$, характеризующую минимальное расстояние в пространстве «время — частота — код» на входе деперемежителя между всеми парами $(i, j)$ битов, принадлежащих одному блоку на выходе кодера. Расстояние во временной области $d_{i,j}^{(t)}$ нормируется на время когерентности канала. Расстояние в частотной области $d_{i,j}^{(f)}$ рассчитывается в виде нормированного отклонения от периода осцилляций в спектре мощности сигнала на выходе двулучевого канала. Расстояние $d_{i,j}^{(c)}$ — расстояние между битами, нормированное на эффективную глубину декодирования используемого кода. Исследования показали, что зависимость $D_{i,j}(M_r)$ соответствует реальному характеру зависимости $P_b(M_r)$, полученному посредством моделирования помехоустойчивости приема, и позволяет определить значения $M_r$, обеспечивающие наилучшую помехоустойчивость, т. е. наименьшее значение $P_b$.

***Литература***

1. Watterson C. C., Juroshek J. R., Bensema W. D. Experimental confirmation of an HF channel model // IEEE Transactions on Communication Technology, 1970. V. 18. № 6. P. 792–803.
2. ARINC Specification 635-2. HF Data Link Protocols. Published: February 27, 1998.

УДК 535.343.2 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.922.923

# Оптические характеристики многослойной структуры с просветленными пленками фазоизменяемых материалов

## Optical Characteristics of a Multilayer Structure with Lighted Films of Phase-change Materials

**Притоцкий Е. М.**
***научный сотрудник***
*pritotsky@bk.ru*

**Юзько Е. П.**
***студентка***
*lenauzko@gmail.com*

**Панков М. А., к. ф.-м. н.**
***старший научный сотрудник***
*mpa.off@gmail.com*

*[1] ИПЛИТ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*
*140700, г. Шатура, ул. Святоозёрская, 1*
*[2] Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых*
*г. Владимир*

**Pritotskii E. M.**
***researcher***
*pritotsky@bk.ru*

**Yuzko E. P.**
***student***
*lenauzko@gmail.com*

**Pankov M. A., Ph.D**
***Senior Researcher***
*mpa.off@gmail.com*

*[1] ILIT RAS — branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS*
*1 Svyatoozerskaya St., Shatura, 140700*
*[2] Vladimir State University*
*Vladimir*

Представлена модель многослойной структуры с просветленными пленками теллурида германия для реализации быстрой многоуровневой модуляции коэффициента пропускания.
**Ключевые слова:** оптическая пленка; фазоизменяемый материал; оптический синапс; нейроморфный процессор.

The paper presents a model of a multilayer structure with antireflection films of germanium telluride for the implementation of fast multilevel modulation of the transmission coefficient.
**Keywords:** optical film; phase-change material; optical synapse; neuromorphic processor.

***Введение***

На сегодняшний день наиболее перспективными являются информационные системы, сочетающие процессы хранения и обработки информации. На этих принципах построены архитектуры искусственных нейроморфных систем, развитие которых осуществляется в направлении увеличения уровней и скорости записи весового коэффициента в искусственный синапс. Целью данной работы является исследование изменения оптических свойств фазоизменяемых материалов для реализации синаптической функции.

***Фазовые переходы***

Фазоизменяемые материалы обладают уникальными свойствами для применений в области хранения данных [1]. Их можно быстро и обратимо переключать между аморфным и кристаллическим состояниями, которые различаются существенно по своим электрическим и оптическим свойствам. Хотя память с произвольным доступом с фазовым переходом уже была продемонстрирована в прошлом веке [2], только за последние два десятилетия было обнаружено, что материалы, такие как теллурид германия (GeTe), кристаллизуются достаточно быстро, чтобы конкурировать с решениями перезаписываемой энергонезависимой памяти. Исследуются различные концепции записи, в которых скорость переключения электрической проводимости пленок GeTe толщиной до 100 нм составляет менее 10 наносекунд [3] и оптического переключения пленок GeTe, полученных с помощью лазерных импульсов в масштабе наносекунд [4].

***Модель многослойной оптической структуры***

Минимизация отражения на границах пленок GeTe с подложкой и воздухом достигается за счет просветляющих слоев сульфида цинка (ZnS) с промежуточным показателем преломления. Предлагаемый подход снизит требуемую плотность энергии инициирующего лазерного излучения $\lambda = 800$ нм и увеличит контраст уровней пропускания для модулируемого оптического сигнала $\lambda = 1550$ нм.

При переходе в кристаллическое состояние поглощение пленки GeTe увеличивается и пропускание снижается, что позволяет реализовать модуляцию оптического сигнала за счет поглощения. Комбинации структур с различной толщиной пленки GeTe позволяют получать четыре контрастных уровня пропускания для воспроизводимости значений при многочисленных циклах записи весового коэффициента. Скорость переключения зависит от скорости изменения фазового состояния в тонких пленках теллурида германия и параметров лазерного излучения.

***Литература***

1. Wuttig M., Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage // Nature materials, 2007. V. 6. № 11. P. 824–832.
2. Ovshinsky S. R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures // Physical Review Letters, 1968. V. 21. № 20. P. 1450.
3. Bruns G., Merkelbach P., Schlockermann C., Salinga M., Wuttig M., Happ T. D., Philipp J. B., Kund M. Nanosecond switching in GeTe phase change memory cells // Applied physics letters, 2009. V. 95. № 4. P. 043108.
4. Sun Xinxing, Lotnyk Andriy, Ehrhardt Martin, Gerlach Jürgen W., Rauschenbach Bernd. Realization of multilevel states in phase-change thin films by fast laser pulse irradiation // Advanced Optical Materials, 2017. V. 5. № 12. P. 1700169.

УДК 621.382 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.924.925

# Проявление эффекта низкой интенсивности в МНОП-структуре

## Appearance of ELDRS in MNOS-Structure

**Мрозовская Е. В.**
***инженер-исследователь 2-й категории[1], аспирант[2]***
*liza.mrozovskaya@mail.ru*

**Чубунов П. А.**
***начальник НПК-3 НТЦ-11***
*chubunov_pa@orkkniikp.ru*

**Зебрев Г. И., д. т. н., профессор[2]**
*gizebrev@mephi.ru*

*[1] Филиал АО «ОРКК-НИИ КП»*
*111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53*
*[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
*115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

**Mrozovskaya E. V.**
***research engineer of the 2nd category[1], postgraduate[2]***
*liza.mrozovskaya@mail.ru*

**Chubunov P. A.**
***head of SPC-3 STC-11***
*chubunov_pa@orkkniikp.ru*

**Zebrev G. I., Ph.D, professor[2]**
*gizebrev@mephi.ru*

*[1] Branch of "URSC — ISDE" JSC*
*53 Aviamotornaya St., Moscow, 111250*
*[2] National Research Nuclear University MEPhI*
*31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia*

В работе экспериментальные данные, полученные при облучении образцов МНОПТ низкоинтенсивным гамма-излучением $^{60}$Co (0,013 рад(Si)/с). Приведено сравнение с результатами предыдущих экспериментов по облучению МНОПТ более высокими мощностями дозы (1,1 рад(Si)/с и 100 рад(Si)/с).
**Ключевые слова:** дозовые эффекты; МНОП; ELDRS; эффект низкой интенсивности.

The paper presents experimental results obtained by irradiation of MNOS-structure at low dose rate (0.013 rad(Si)/s). The comparison of the sensitivities observed at different irradiation dose rates has been given.
**Keywords:** dose effects; RADFET; ELDRS.

***Введение***

Использование МДП-структур с толстым окислом в качестве датчиков накопленной дозы является распространенным и эффективным способом мониторинга воздействия ионизирующего излучения в части дозы на бортовую аппаратуру. Для калибровки и дальнейшего использования таких датчиков перед полетом проводят ускоренные наземные испытания, обычно при мощности дозы больше 10 рад(Si)/с, в то время как в космическом пространстве мощность дозы колеблется от $10^{-5}$ до 0,1 (Si)/с. Несоответствие мощностей дозы может привести к недооценке коэффициента чувствительности датчика, что чревато ошибками в интерпретации результатов измерений. В настоящей работе мы экспериментально исследовали влияние мощности дозы на коэффициент чувствительности к дозе МНОП-структур с различной толщиной окисла.

***Результаты эксперимента***

В качестве экспериментальных образцов были использованы МНОП-транзисторы двух типов с толщиной окисла 500 и 150 нм [1]. Облучение производилось низкоинтенсивным гамма-излучением $^{60}$Co с мощностью дозы 0,013 рад(Si)/с. Параметром отклика датчика к воздействию дозы является сдвиг порогового напряжения $\Delta V_T$. Коэффициент чувствительности датчика к дозе выражается как $K_d = d\Delta V_T/dD$.

Результаты эксперимента были сравнены с данными об облучении МНОП-структур более высокими мощностями дозы (1,1 рад(Si)/с и 100 рад(Si)/с) из предыдущих работ [2].

Проведенный анализ показал, что коэффициент чувствительности для образца с толщиной окисла 500 нм растет с уменьшением мощности дозы. Для образца с толщиной окисла 150 нм растет при изменении мощности дозы с 100 рад(Si)/с до 1,1 рад(Si)/с и незначительно уменьшается при дальнейшем изменении мощности дозы до 0,013 рад (Si)/с, что может объясняться погрешностью дозиметрии и/или эффектом долговременного отжига [3].

Полученные результаты согласуются с работами [4, 5] и дают задел для развития методов наземных испытаний МДП-структур с учетом эффекта низкой интенсивности.

***Литература***

1. Zimin P. et al. ELDRS in p-MOS and p-MNOS Based RADFETs with Thick Gate Insulators // A report accepted to RADECS 2018, Sweden, September 16th-21st, 2018.
2. Mrozovskaya E.V. et al. Compact modeling of electrical characteristics of p-MNOS based RADFETs // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2019.
3. Mrozovskaya E.V. et al. Simulation of annealing and the ELDRS in p-MNOS RadFETs // High Temperature Material Processes, 2019. 23 (4). P. 313–318.
4. Zebrev G.I. et al. Compact Modeling of MOSFET I-V Characteristics and Simulation of Dose-Dependent Drain Currents // IEEE Trans. Nucl. Sci., Aug. 2017. V. 64. № 8. P. 2212–2218.
5. Zimin P.A. et al. Calibration and electric characterization of p-MNOS RADFETs at different dose rates and temperatures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019. 940. P. 307–312.

УДК 621.36 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.926.927

# Исследование характеристик активно-индуктивных цепей с отрицательной групповой задержкой на верхних частотах

## Investigation into High-pass Negative Group Delay RL-Circuits Characteristics

**Тищук Б. Ю.**
***студент***
*Университет ИТМО*
*г. Санкт-Петербург*
*tishuk52@gmail.com*

**Tishchuk B. Y.**
***student***
*ITMO University*
*St. Petersburg*
*tishuk52@gmail.com*

В данной работе было проведено исследование характеристик активно-индуктивных электрических цепей с отрицательной групповой задержкой на верхних частотах. Были разработаны и изготовлены два прототипа, на которых проводились измерения характеристик. Измеренные значения коррелируют со значениями, полученными при симуляции схем прототипов.
**Ключевые слова:** отрицательная групповая задержка; активно-индуктивные цепи; измерение ОГЗ; теория электрических цепей.

The paper considers the characteristics of resistive-inductive electrical circuits with negative group delay at high frequencies. Two prototypes have been developed and manufactured to take measurements. The measured values correlate with the values obtained by simulation of SPICE model and theoretical calculations.
**Keywords:** NGD (negative group delay); RL-circuits; NGD measurement; electrical circuit theory.

### *Введение*

В настоящее время в связи с развитием высокоскоростных электронных устройств проблема компенсации групповой задержки является особенно актуальной. Одним из способов ее компенсации является применение цепей с отрицательной групповой задержкой [1, 3]. Целью данной работы является исследование характеристик цепей с ОГЗ.

### *Теоретические выкладки*

Для цепей с отрицательной групповой задержкой (ОГЗ) можно провести аналогию с фильтрами и разделить их на цепи с ОГЗ на нижних частотах, верхних частотах, полосно-пропускающие, имеющие отрицательную групповую задержку в соответствующем частотном диапазоне [2]. На рис. 1 показана зависимость групповой задержки от частоты для каждого типа цепи с ОГЗ.

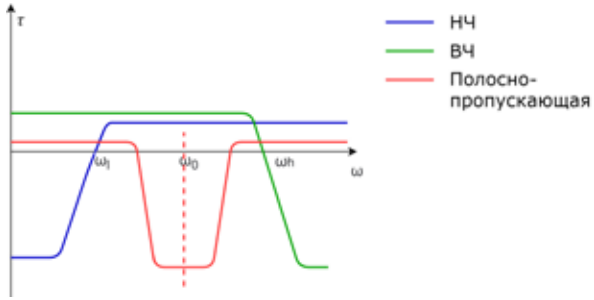



**Рис. 1.** График групповой задержки типов цепей с ОГЗ

В данной работе объектом исследования являются цепи с ОГЗ на верхних частотах. Для цепи, схема которой представлена на рис. 2, была составлена модель и рассчитаны характеристики (частота среза, затухание, оптимальная частота, оптимальная групповая задержка, оптимальное затухание) на двух наборах параметров элементов.

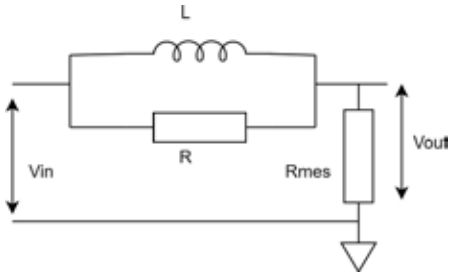



**Рис. 2.** Принципиальная схема исследуемых прототипов

***Эксперимент и результаты***

Для проведения эксперимента было разработано и произведено два прототипа активно-индуктивных цепей с ОГЗ по обозначенной выше схеме. Результаты измерений коррелируют с теоретическими расчетами и симуляцией модели схемы в LTSpice.

***Литература***

1. Kitano M., Nakanishi T., Sugiyama K. Negative group delay and superluminal propagation: An electronic circuit approach // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, (2003), 9 (1). P. 43–51.
2. Ravelo B. Similitude between the NGD function and filter gain behaviors // International Journal of Circuit Theory and Applications, (2014), 42(10). P. 1016–1032.
3. Ravelo B., Liu Y. Microwave/digital signal correction with integrable NGD circuits // Proc. of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IMS 2012), Montreal, Canada, 2012; 13. P. 17–22.

УДК 538.915 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.928.929

# Влияние СТД на электрические и оптические свойства широкозонных соединений $A^2B^6$

## Influence of Native Point Defects on Electrical and Optical Properties of Wide-zone $A^2B^6$ Compounds

**Кобелева С. П.**
***доцент***
*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*
*119049, г. Москва, Ленинский просп., 4*
*kob@misis.ru*

**Kobeleva S. P.**
***associate professor***
*NUST MISIS*
*4 Leninsky Ave., Moscow, 119049*
*kob@misis.ru*

В работе рассмотрены модели образования собственных точечных дефектов в халькогенидах кадмия и цинка, способы управления концентраций СТД и их влияние на электрические и оптические свойства материалов.
**Ключевые слова:** собственные точечные дефекты; халькогениды кадмия и цинка; область гомогенности; фоточувствительность; люминесцентные свойства.

The paper presents models of native point defects formation in cadmium and zinc chalcogenides, methods of controlling their concentrations and their effect on the electrical and optical properties of materials.
**Keywords:** native point defects; cadmium and zinc chalcogenides; homogeneity region; photosensitivity; luminescent properties.

### *Введение*

Халькогениды кадмия и цинка, являясь прямозонными материалами, по ширине запрещенной зоны (Eg) перекрывают видимый диапазон спектра от 1,5 эВ в CdTe до 3,9 эВ в ZnS, причем в отличие от широкозонных соединений группы $A^3B^5$ наиболее широкозонный из них встречается в природе (сфалерит, $\alpha - ZnS$). Несмотря на это, ряд особенностей, связанных с влиянием собственных точечных дефектов (СТД) на свойства соединений, ограничивают их применение, особенно для создания полупроводниковых источников излучения — СИД и инжекционных лазеров. В докладе рассмотрены вопросы образования СТД и их свойства в халькогенидах кадмия и цинка.

### *Диаграммы состояния халькогенидов кадмия и цинка*

Низкотемпературные модификации халькогенидов кадмия и цинка формируются преимущественно в кубической структуре сфалерита (алмазоподобная ГЦК-решетка). Отклонение от стехиометрии (δ) на границе области гомогенности достигает $10^{-3}$ ат%, область гомогенности симметрична. При испарении соединения полностью разлагаются на атомы металла и двух- (Te), четырех-, шести- (Se, S) атомные молекулы халькогена, причем равновесная паровая фаза на границах

области гомогенности в широком интервале температур состоит практически из одного избыточного компонента. Это вместе с электрической активностью СТД определяет технологические проблемы получения монокристаллов с минимальной концентрацией СТД.

***Методы измерения параметров СТД***

Поскольку СТД в $A^2B^6$ электрически активны и определяют тип и величину проводимости в нелегированных материалах, одним из основных методов измерения концентрации СТД является измерение концентрации свободных носителей заряда (СНЗ) эффектом Холла с последующими оценками концентраций СТД методом квазихимических реакций [1, 2]. Вторая важная группа методов связана с измерением состава равновесной паровой фазы [2]. Методы, основанные на истечении избыточного компонента, показывают полную величину δ на границах области гомогенности.

***Типы и зарядовые состояния СТД***

СТД, формирующие область гомогенности, электрически активны, имеют одно- и двукратно заряженные состояния. При избытке халькогена соединения имеют дырочную проводимость, при избытке металла — электронную. Межузельный металл, находясь в условиях всестороннего сжатия, будет легко сбрасывать S-оболочку и даже при комнатной температуре будет двухзарядным донором. Однако относительный вклад вакансионных и межузельных дефектов является дискуссионным. С развитием методов измерения состава паровой фазы [2] и определения δ по истечению избыточного компонента было установлено, что на границе области гомогенности большую роль играют либо нейтральные дефекты и их комплексы (к примеру, дивакансии компонентов), либо компенсирующие основные антиструктурные дефекты, концентрация которых сильнее зависит от парциальных давлений компонентов, чем вакансионных и межузельных и поэтому не проявляющихся внутри области гомогенности [3].

***Люминесценция нелегированных соединений***

Рассмотрены спектры пропускания и люминесценции халькогенидов кадмия и цинка и показано, что материалы можно использовать как для создания ИК-источников, так и СИД-области, близкой к ультрафиолетовой.

***Литература***

1. Крегер Ф. А. Химия несовершенных кристаллов. — М.: Мир, 1969.
2. Аветисов И. Х. Фазовые равновесия в системах A(II)B(VI) // Высокочистые вещества. — М.: Научный мир, 2018. — С. 704–753.
3. Кобелева С. П. Влияние собственных точечных дефектов на процессы испарения халькогенидов кадмия и цинка: канд. дисс. — М.: МИСиС, 1982.

УДК 621.375.1 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.930.931

# Усилитель мощности класса G для инфокоммуникационных систем

## Class-G Power Amplifier for Infocommunication Systems

**Леонтьев Е. В.**
***инженер***
*leontiev_ev@spbstu.ru*

**Коротков А. С.**
***профессор***
*korotkov@spbstu.ru*

**Матвеев Ю. А.**
***руководитель группы***
*matveev_yua@spbstu.ru*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29*

**Leontiev E. V.**
***engineer***
*leontiev_ev@spbstu.ru*

**Korotkov A. S.**
***professor***
*korotkov@spbstu.ru*

**Matveev Y. A.**
***head of group***
*matveev_yua@spbstu.ru*

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)*
*29 Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia*

В работе реализован усилитель мощности класса G. Показана целесообразность проектирования только двух- и трехуровневого усилителя огибающей для сигналов с OFDM. Приведены результаты измерений модуля и способы повышения линейности усилителя.
**Ключевые слова:** усилитель с отслеживанием огибающей; усилитель класса G; OFDM; CCDF; ACPR; DPD.

This paper presents the class-G power amplifier. The design of two- or three-level envelope amplifier is advisable for OFDM signals. The article shows the experimental results and discusses the ways of improving linearity.
**Keywords:** envelope tracking power amplifier; class-G amplifier; OFDM; CCDF; ACPR; DPD.

### *Введение*

Для эффективного усиления сигналов с высоким PAPR наиболее часто применяется архитектура Доэрти или схема усилителя с отслеживанием огибающей

(ETPA — Envelope Tracking Power Amplifier) [1]. Усилитель класса G является частным случаем ETPA [2]. Напряжение питания усилителя мощности класса G коммутируется между несколькими уровнями в зависимости от значения огибающей. Усилитель огибающей в структуре УМ класса G работает более эффективно на сигналах с высокой пропускной способностью, чем в ETPA. Однако УМ класса G имеет высокие нелинейные искажения, которые следует компенсировать дополнительными методами линеаризации.

***Выбор структуры усилителя огибающей***

При реализации усилителя мощности класса G следует определить величину дискретных уровней напряжения питания и их количество. В целях нахождения оптимального решения для сигналов с OFDM авторами предложено изучение зависимости CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) на примере LTE E-TM3.1. В работе показано, что коммутация между двумя уровнями может обеспечить прирост КПД с 18 до 34,9 %, между тремя уровнями — до 39,1 %. А при коммутации напряжения питания между семью уровнями эффективность может вырасти до 40 %. Наибольший прирост в КПД достигается при коммутации только двух или трех уровней напряжения питания, поэтому оптимально проектировать только двух- или трехуровневый усилитель огибающей.

***Результаты***

Модуль спроектирован на основе усилителя с максимальной выходной мощностью 30 Вт на частоте 950 МГц при напряжении питания $V_{DD}$ = 28 В. Использование коммутации $V_{DD}$ между 10,8–28 В позволило увеличить КПД до 36 % при ACPR = −27 дБн. А при коммутации $V_{DD}$ между тремя уровнями достигается эффективность 46 % при ACPR = −19 дБн.

Низкое значение ACPR связано с высокими нелинейными искажениями. AM-AM-конверсия в УМ составляет 4 дБ, а AM-ФМ-конверсия при переключении $V_{DD}$ равна 30°. Таким образом, для данного класса усилителей актуальна разработка методов линеаризации, таких как DPD (Digital Pre-Distortion) [3] или RFPD (Radio Frequency Pre-Distortion) [4], алгоритмы которых позволяют описывать данный род нелинейных искажений.

***Литература***

1. Wang Zh. Envelope tracking power amplifiers for wireless communications. Artech House. London, 2014.
2. Wolff N. et al. Linearity analysis of a 40 W class-G-modulated microwave power amplifier // Proceedings of the 45th European Microwave Conference. Paris, 2015.
3. Afsardoost S., Eriksson T., Fager C. Digital predistortion using a vector-switched model // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012. V. 60. № 4. P. 1166–1174.
4. Roger F. A 200mW 100 MHz-to-4GHz 11 th-order complex analog memory polynomial predistorter for wireless infrastructure RF amplifiers // IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC). San Francisco, 2013. P. 94–95.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.932.934

# Исследование возможностей интеграции процессов формирования покрытий для выращивания 1D-2D-материалов с технологией КМОП

## Study of Opportunities for Integrating Coating Formation Processes for the 1D-2D Material Growth in CMOS Technology

**Тельминов О. А., к. т. н.**
***начальник лаборатории*[1]**
*otelminov@niime.ru*

**Горнев Е. С., член-корреспондент РАН, д. т. н.**
***начальник управления РПТН*[1]**
*egornev@niime.ru*

**Янович С. И.**
***главный специалист*[1]**
*syanovich@niime.ru*

**Шарапов А. А.**
***научный сотрудник*[1], *аспирант*[2]**
*andrey.sharapov@phystech.edu*

**Мошкарова Л. А.**
***младший научный сотрудник*[1]**
*lmoshkarova@niime.ru*

**Шахманова М. В.**
***инженер-программист 3-й категории*[1]**
*mshakhmanova@niime.ru*

[1] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*
[2] *Московский физико-технический институт*
*(национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

**Telminov O. A., Ph.D**
***head of the laboratory*[1]**
*otelminov@niime.ru*

**Gornev E. S., Corresponding Member of RAS, Ph.D**
***head of PTD management*[1]**
*egornev@niime.ru*

**Yanovich S. I.**
***chief specialist*[1]**
*syanovich@niime.ru*

**Sharapov A. A.**
***research scientist*[1], *postgraduate*[2]**
*andrey.sharapov@phystech.edu*

**Moshkarova L. A.**
***junior researcher***[1]
*lmoshkarova@niime.ru*

**Shakhmanova M. V.**
***software engineer of the 3rd category***[1]
*mshakhmanova@niime.ru*

[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*

В работе исследуются методы выращивания 1D-2D-материалов, особенности технологических процессов формирования покрытий и их совместимость с традиционной КМОП-технологией.
**Ключевые слова:** 1D-2D-материалы; ZnO; Gr; GrO; КМОП-технология.

The paper investigates methods for growing 1D-2D materials, features of technological processes for forming coatings and their compatibility with traditional CMOS technology.
**Keywords:** 1D-2D materials; ZnO; Gr; GrO; CMOS technology.

### *Введение*

Планарная технология широко применима в кремниевой микроэлектронике [1]. Однако, востребованы также технологии создания нетрадиционной элементной базы, для которых необходим поиск новых материалов одномерных и двумерных структур. Среди 1D-материалов популярностью пользуется оксид цинка (ZnO, ширина запрещенной зоны Eg = 3,37 эВ), а в области 2D-материалов — графен (Gr) и оксид графена (GrO). Эти структуры позволяют решать проблемы миниатюризации электронных устройств, а также обладают уникальными оптическими, электрофизическими, теплофизическими и механическими свойствами.

### *Формирование 1D-2D-структур*

Для получения 1D-структур применяют два основных подхода [2]. Первый основан на стандартных методах микроструктурирования и позволяет получать упорядоченные наноструктуры. Второй подход заключается в самопроизвольном росте одномерных наноструктур при использовании методов газофазного химического синтеза, электрохимического осаждения, кристаллизации из пара или жидкой фазы. Его недостатком является сложность интеграции полученных наноструктур со стандартной элементной базой.

Монокристаллические наностержни оксида цинка могут быть использованы для создания миниатюрных ярких и экономичных коротковолновых источников света, а также служить рабочими элементами различных газовых и жидкостных сенсоров, электродов и других устройств.

Для синтеза графена используются механические методы (отшелушивание [3], расщепление), химические методы [4] (методы термического химического осаждения из паровой фазы (CVD), интеркалирование, методы химического осаждения из паровой фазы, усиленные плазмой (PECVD), электрохимический и др.), а также

эпитаксия и разложение [5] (гетероэпитаксиальное выращивание, термическое разложение на SiC и других подложках). Исследование существующих технологий выращивания 2D-структур на подложках показало их совместимость с КМОП-технологией.

***Работа профинансирована грантом Минобрнауки России в форме субсидии от 25.09.2020 г. № 075-15-2020-791 (номер государственного учета НИОКТР АААА-А20-120110990073-7).***

***Литература***

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 434 с. ISBN 978-5-94836-611-1.
2. Comini E., Baratto C., Faglia G., Ferroni M., Vomiero A., Sberveglieri G. Quasi-one dimensional metal oxide semiconductors: Preparation, characterization and application as chemical sensors // Prog. Mater. Sci., 2009. V. 54. P. 1–67.
3. Novoselov K. S., Jiang D., Schedin F., Booth T. J., Khotkevich V. V., Morozov S. V. and Geim A. K. Two-dimensional atomic crystals // PNAS, 102, 10451 (2005).
4. Somani P. R., Somani S. P. and Umeno M. Planer nanographenes from camphor by CVD // Chemical Physics Letters, 430, 56 (2006).
5. Wu Z., Ren W., Gao L., Liu B., Jiang C. and Cheng H. Synthesis of high-quality graphene with a pre-determined number of layers // Carbon, 47, 493 (2009).

***The work was funded by a grant from the Ministry of Education and Science of Russia in the form of a subsidy dated September 25, 2020 № 075-15-2020-791 (R&D state registration number AAAA-A20-120110990073-7).***

УДК 004.046 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.935.937

# Метод навигации, основанный на анализе степени поляризации небесного свода

## Navigation Method Based on the Analysis of the Sky Polarization Degree

**Карнуп Г. А.**
***студент*[1], *техник*[2]**
*karnup.ga@phystech.edu*

**Черкасов А. М.**
***аспирант*[1]**
*cherkasov.am@phystech.edu*

[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
*141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
[2] *АО «НИИМЭ»*
*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

**Karnup G. A.**
***student*[1], *technician*[2]**
*karnup.ga@phystech.edu*

**Cherkasov A. M.**
***postgraduate*[1]**
*cherkasov.am@phystech.edu*

[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
*9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701*
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
*6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460*

Разработан новый алгоритм поиска положения Солнца с использованием данных о распределении степени поляризации небесного свода в условиях сильной (до 80 %) облачности. Были проведены сравнения предложенной целевой функции с традиционно используемыми для данной задачи: манхэттенской нормой и энтропийным методом. Также было исследовано влияние кластеризации на точность предсказаний.
**Ключевые слова:** метод максимального правдоподобия; кластеризация; энтропия; облака; поляризация; навигация.

A new algorithm for searching for the position of the Sun has been developed using data on the distribution of the degree of polarization of the sky in conditions of strong (up to 80 %) cloud cover. We have compared the proposed objective function with those traditionally used for this task: the Manhattan norm and the entropy method. The influence of clustering on the accuracy of predictions has also been investigated.
**Keywords:** maximum likelihood method; clustering; entropy; clouds; polarization; navigation.

***Введение***

Как известно, проходя через атмосферу, солнечный свет рассеивается на частицах и частично поляризуется, приобретая линейную поляризацию. Причем картина распределения степени поляризации однозначно зависит от положения Солнца [1]. Целью данной работы является определение эффективного метода поиска положения Солнца в условиях высокой (до 80 %) облачности и сравнение разработанного нами метода с другими популярными алгоритмами [2–4].

***Определение положения Солнца***

Суть разработанного нами метода заключается в сравнении теоретически рассчитанной картины распределения степени поляризации с экспериментальным изображением. Ошибку предсказания определяет целевая функция.

***Целевые функции***

Мы разработали целевую функцию, основанную на методе максимального правдоподобия, и сравнили ее с двумя наиболее популярными для данной задачи — манхэттенской нормой и энтропией. Точность предсказаний нашей функции в среднем на 15 % выше и менее чувствительна к наличию облаков. Это достигается за счет последовательного анализа значений спектра интенсивности изображения. Кроме того, мы исследовали влияние кластеризации изображений на точность работы целевых функций. При определенных условиях ошибка предсказания уменьшается до 3–4° при облачности более 60 %. Однако можно выделить сценарии, когда точность с кластеризацией падает. Так как проекция траектории Солнца биективно зависит от широты наблюдения, то с той же точностью можно предсказать широту (рис. 1) и время наблюдения, а также ориентацию наблюдателя относительно сторон света.

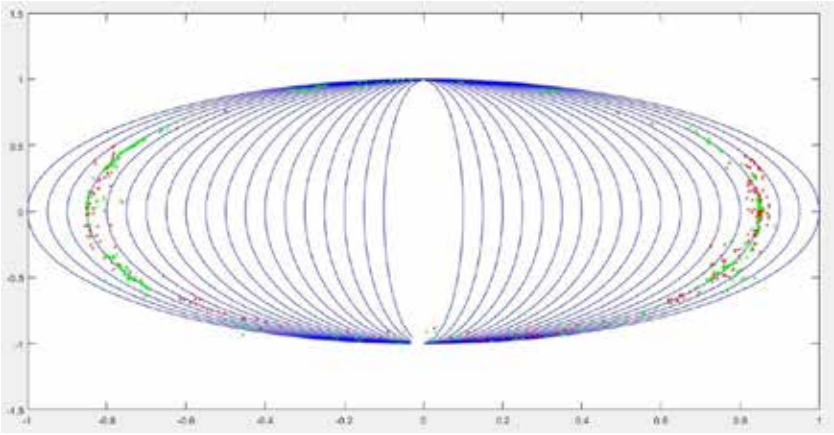


**Рис. 1.** Наложение предсказанных нашим методом координат Солнца на карту его действительных траекторий. Зеленое — облачность <50 %, красное — >50 %

**Таблица 1.** Погрешность различных методов в предсказании положения Солнца

| | Манх. норма | | Метод правдоподобия | | Энтропия | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Облачность | $\Delta\varphi_S$ | $\Delta\theta_S$ | $\Delta\varphi_S$ | $\Delta\theta_S$ | $\Delta\varphi_S$ | $\Delta\theta_S$ |
| 0–15 % | 10° | 11° | 6° | 5° | 14° | 16° |
| 16–50 % | 16° | 14° | 10° | 10° | 20° | 18° |
| >50 % | 21° | 19° | 14° | 12° | 32° | 29° |

***Литература***


1. Gábor Horváth et al. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation // The Journal of Experimental Biology, 2001. № 204 (17).
2. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазия? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
3. Huijie Zhao and Wujian Xu and Ying Zhang Polarization patterns under different sky conditions and a navigation method based on the symmetry of the AOP map of skylight // Optics Express, 2018. — № 463 (2080).
4. Hao Lu et al. Angle algorithm based on Hough transform for imaging polarization navigation sensor // Optics Express, 2015. № 23 (6).

УДК 538.935 + 538.945 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.938.939

# Фундаментальные физические ограничения и перспективы развития наноэлектроники

## Fundamental Physical Limitations and Trends in Nanoelectronics Development

**Арутюнов К. Ю., д. ф.-м. н., профессор**[1]
***ведущий научный сотрудник***[2]
*karutyunov@hse.ru*

[1] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)*
*123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*
[2] *Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН*
*119334, г. Москва, ул. Косыгина, 2*

**Arutyunov K. Y., Sc.D**
***professor*[1]*, leading scientist***[2]
*karutyunov@hse.ru*

[1] *National Research University "Higher School of Economics" (Moscow Institute of Electronics and Mathematics)*
*34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia*
[2] *P. L. Kapitza Institute for Physical Problems of Russian Academy of Sciences*

Представлен обзор основных причин, ограничивающих миниатюризацию наноэлектронных систем. В элементах сверхмалых размеров, построенных с использованием стандартной металлической и полупроводниковой технологии, различные эффекты фундаментального характера приводят к нарушению штатного режима работы. Приводятся примеры сверхпроводящих наноэлектронных устройств.
**Ключевые слова:** квантовая наноэлектроника; мезоскопическая сверхпроводимость; квантовые размерные эффекты.

The paper reviews principal sources limiting future miniaturization of nanoelectronic components. Various phenomena of fundamental origin degrade the performance of ultra-small conventional metal and/or semiconductor nanoelectronic components. Possible applications of mesoscopic-size superconducting elements have been given.
**Keywords:** quantum nanoelectronics; mesoscopic superconductivity; quantum size phenomena.

### *Введение*

В последние годы наблюдаются отклонения от хорошо известного правила Мура, описывавшего рост степени интеграции элементной базы микроэлектроники на протяжении нескольких десятилетий ее развития, построенной с применением стандартной КМОП-технологии. Обычно выделяют две основные причины: увеличение тепловыделения на единицу объема и различные квантовые размерные эффекты [1].

***Сверхпроводящая наноэлектроника***

Представляется крайне заманчивым использовать сверхпроводящие материалы, в которых протекание электрического тока происходит бездиссипативно. Однако и в сверхпроводниках присутствуют различные размерные ограничения, приводящие к отклонению поведения таких сверхминиатюрных систем от стандартных объектов макроскопических размеров, например наличие конечного электрического сопротивления и подавление незатухающих (мэйсснеровских) токов. В докладе обсуждаются различные нетривиальные эффекты в низкоразмерных сверхпроводниках [2] и приводятся примеры сверхпроводящих устройств нанометровых размеров — элементов квантовой логики (кубитов) [3], не содержащих диэлектрических слоев «одноэлектронного» сверхпроводящего транзистора [4], и квантового эталона силы электрического тока [5].

***Литература***

1. Sedov E. A., Riikonen Kari-Pekka and Arutyunov K. Yu. Quantum size phenomena in single-crystalline bismuth nanostructures // Nature: Quantum Materials 2, article number 18 (2017).
2. Arutyunov K. Yu., Golubev D. S. and Zaikin A. D. Superconductivity in one dimension // Physics Reports 464, 1–70 (2008).
3. Astafiev O. V., Ioffe L. B., Kafanov S., Pashkin Yu. A., Arutyunov K. Yu., Shahar D., Cohen O. & Tsai J. S. Coherent quantum phase slip // Nature 484 (7394), 355 (2012).
4. Arutyunov K. Yu., Lehtinen J. S. Junctionless Cooper pair transistor// Physica C: Superconductivity and its applications, 533, 158 (2017).
5. Wang Z., Lehtinen J. S. and Arutyunov K. Yu. Towards quantum phase slip based standard of electric current // Appl. Phys. Lett. 114, 242601 (2019).

УДК 621.382.323 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.940.942

# Исследование влияния температуры на сбоеустойчивость КМОП-ячеек памяти с уменьшением размеров транзисторов

## Investigation into the Temperature Effect on the Radiation Failure Stability of CMOS Memory Cells with a Reduction of Transistor Sizes

**Попов Д. А., к. т. н.**
***доцент***
*da.popov@hse.ru*

**Силкин Д. С., к. т. н.**
***научный сотрудник***
*dsilkin@hse.ru*

**Султанов А. О.**
***студент***
*asultanov@edu.hse.ru*

**Мухаметдинова А. Р.**
***студент***
*armukhametdinova@edu.hse.ru*

**Галлямов Б. И.**
***студент***
*bigallyamov@edu.hse.ru*

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)*
*123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*

**Popov D. A., Ph.D**
***associate professor***[1]
*da.popov@hse.ru*

**Silkin D. S., Ph.D**
***researcher***
*dsilkin@hse.ru*

**Sultanov A. O.**
***student***
*asultanov@edu.hse.ru*

**Muhametdinova A. R.**
***student***
*armukhametdinova@edu.hse.ru*

**Gallyamov B. I.**
***student***
*bigallyamov@edu.hse.ru*

*National Research University "Higher School of Economics"*
*(Moscow Institute of Electronics and Mathematics)*
*34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia*

В работе представлены результаты смешанного TCAD-SPICE-моделирования воздействия тяжелой заряженной частицы на ячейки памяти на основе транзисторов, изготовленных по технологиям 130 и 90 нм КМОП и 30 нм FinFET в диапазоне температур от 300 до 573 K. have been
**Ключевые слова:** тяжелые заряженные частицы; ячейка памяти; температура; TCAD.

The paper presents the results of a mixed TCAD-SPICE simulation of the single event upset on 6T SRAM cells based on transistors manufactured using 130 nm and 90 nm CMOS and 30 nm FinFET technologies in the temperature range from 300 K to 573 K.
**Keywords:** single event upset; SRAM; temperature; TCAD.

***Введение***

В условиях космического пространства электронные устройства подвергаются различным видам радиационного воздействия. Одним из факторов, приводящих к критическим сбоям схем статических ячеек памяти, является удар тяжелой заряженной частицы [1]. Современные системы приборно-технологического проектирования позволяют оценить радиационную стойкость полупроводникового устройства на ранних стадиях разработки, однако достоверный результат моделирования может быть получен только после калибровки на основе экспериментальных данных, особенно для нанометровых устройств.

В данной работе разрабатывается физическая TCAD-модель для учета воздействия тяжелой заряженной частицы с учетом температурных эффектов.

***Полученный результат***

Было проведено смешенное TCAD-SPICE-моделирование воздействия частицы кислорода на ячейки памяти на основе 130, 90 нм МОПТ и 30 нм FinFET.

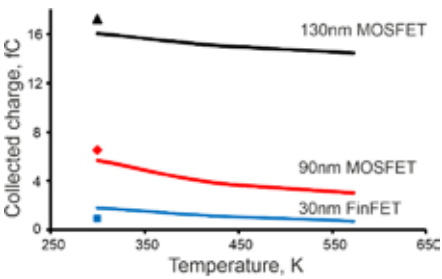



**Рис. 1.** Зависимость собранного заряда от температуры для различных длин каналов транзисторов

Валидация модели TCAD была проверена на основе экспериментальных данных. На рис. 1 показана зависимость собранного заряда после воздействия тяжелых ионов от температуры для трех технологических норм. Точки на рис. 1 указывают

на экспериментальные данные из [2–3] для 300 K. Температурная зависимость согласуется с данными из [4]. Среднеквадратичная погрешность моделирования для всех устройств составляет не более 15 %.

***Выводы***

Разработана физическая TCAD-модель воздействия тяжелой частицы на полупроводниковые структуры. Модель использовалась для определения критического заряда, приводящего к переключению ячейки 6T SRAM на основе 130, 90 нм МОПТ и 30 нм FinFET в диапазоне температур от 300 до 573 K.

***Литература***

1. Patterson R. L. et al. Electronic Components for Use in Extreme Temperature Aerospace Applications // 12th International Components for Military and Space Electronics Conference (CMSE 08), San Diego, 2008.
2. Kobayashi D. Scaling Trends of Digital Single-Event Effects: A Survey of SEU and SET Parameters and Comparison With Transistor Performance // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 2021. Vol. 68. № 2. P. 124–148.
3. Li G. et al. Influence of Fin Width on Single-Event-Upset Characteristics of FinFET SRAM // Semiconductor Science and Technology, 2020. Vol. 35. № 3. P. 1–5.
4. Truyen D. et al. Temperature Effect on Heavy-Ion Induced Parasitic Current on SRAM by Device Simulation: Effect on SEU Sensitivity // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 2007. Vol. 54. № 4. P. 1025–1029.

УДК 538.945 + 538.955 DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.943.944

# Сверхпроводящая спинтроника — перспективное направление криогенной наноэлектроники

## Superconducting Spintronics — an Advanced Field of Cryogenic Nanoelectronics

**Пугач Н. Г.**
***доцент, старший научный сотрудник***
*pugach@magn.ru*

**Селезнев Д. В.**
***студент магистратуры***
*dvseleznyov@edu.hse.ru*

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*
*123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*

**Pugach N. G.**
***Assoc. Prof., Senior researcher***
*pugach@magn.ru*

**Seleznyov D. V.**
***student***
*dvseleznyov@edu.hse.ru*

*National Research University "Higher School of Economics"*
*34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia*

Сверхпроводниковая спинтроника является новой областью в наноэлектронике квантовых систем, которая появилась в XXI веке и активно развивается в последние годы. Ее основной идеей, как и в обычной спинтронике, является использование переноса спина электронов для хранения и обработки информации, но эта идея реализована в сверхпроводящих контурах при низкой температуре. В качестве примера приведен расчет обратного эффекта близости в наноструктуре сверхпроводник — ферромагнитный диэлектрик.
**Ключевые слова:** сверхпроводимость; магнетизм; спинтроника; наноэлектроника.

Superconducting spintronics has emerged in the last decade as a promising new field that seeks to open a new dimension for nanoelectronics by utilizing the internal spin structure of the superconducting Cooper pair as a new degree of freedom. Currently, the discipline finds itself at the crossroads for developing first-generation devices. Among the basic units of superconducting spintronics are the so-called superconducting spin valves. These are nanodevices in which the superconducting current is controlled through the spin degree by changing the magnetization of magnetic elements.
**Keywords:** superconductivity; magnetism; spintronics; nanoelectronics.

***Актуальность***

Тенденция к миниатюризации элементов электронных цепей, наблюдающаяся в последние десятилетия, до недавнего времени хорошо описывалась эмпирическим правилом Мура: каждые 18 месяцев количество элементов интегральной схемы удваивается. Однако сейчас становится очевидным, что дальнейшее увеличение степени

интеграции коммерческих наноэлектронных изделий перестало быть возможным. Первая причина чисто технологическая — невозможность эффективного отвода тепла, выделяемого в единице объема (площади) интегральной схемы. Вторая проблема — фундаментальная: при достижении определенных размеров (очень грубая оценка — порядка 10 нм) процесс протекания электрического тока в таких сверхминиатюрных элементах уже не подчиняется законам классической физики и в действие вступают качественно новые квантовые явления, нарушающие штатный режим работы устройства. Решением этих проблем мог бы быть отказ от использования десятилетиями отработанных методов КМОП (комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) и переход на сверхпроводящие материалы [1].

***Предметная область***

В докладе дан обзор существующих направлений развития сверхпроводниковой наноэлектроники, включая магнитную память, джозефсоновскую логику, кубиты и квантовые компьютеры. Эта новая область призвана решать следующие задачи: энергосбережение, миниатюризация элементов, их быстродействие и, наконец, обеспечение работы принципиально нового типа устройств — квантовой логики. В заключение в качестве примера приведен расчет обратного эффекта близости [2] в наноструктуре сверхпроводник — ферромагнитный диэлектрик.

Н. Г. Пугач благодарит проект «Зеркальные лаборатории» НИУ ВШЭ за поддержку межуниверситетского сотрудничества. Д. В. Селезнев благодарит проекты «Элементы сверхпроводящей спинтроники для применения в квантовой наноэлектронике», в рамках которого рассчитаны функции Грина, и проект «Экспериментальное и теоретическое исследование неравновесных явлений в гибридных наноструктурах» НИУ ВШЭ за поддержку расчета параметра сверхпроводящего порядка.

***Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, мегагрант № 075-15-2019-1934.***

***Литература***

1. Ouassou J. A., Paul A., Blamire M., Eschrig M. and Linder J. Triplet Cooper pairs induced in diffusive s-wave superconductors interfaced with strongly spin-polarized magnetic insulators or half-metallic ferromagnets // Scientific Reports (2016).
2. Yagovtsev V. O. and Pugach N. G. and Eschrig M. The inverse proximity effect in strong ferromagnet–superconductor structures // Supercond. Sci. Technol., 2021.
3. Яговцев В. О., Пугач Н. Г. Намагниченность, наведенная в сверхпроводнике из-за эффекта близости с ферромагнитным диэлектриком // Физика металлов и металловедение, 2020. — Т. 121. — № 3. — С. 277–282.

N. G. Pugach thanks HSE “Mirror Laboratories” project for supporting inter-university cooperation. D. V. Seleznyov thanks the project “Experimental and theoretical study of nonequilibrium phenomena in hybrid nanostructures” for supporting the calculation of the superconducting order parameter. The calculation of the Green functions was done by him in the framework of the project “Elements of superconducting spintronics for quantum nanoelectronics” HSE.

***Work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Megagrant № 075-15-2019-1934.***

# ПРОГРЕСС

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО**
**«Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс»**

- Ведущий дизайн-центр Российской Федерации по разработке специализированной микроэлектронной элементной базы
- Участник и головной исполнитель по ряду государственных программ
- Межотраслевой центр проектирования СБИС типа «система на кристалле»
- Разработчик и производитель ГЛОНАСС/GPS навигационных приемников, микроэлектронной аппаратуры

## СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТОК И ПРОДУКЦИИ

МОБИЛЬНАЯ И СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ

НАВИГАЦИЯ И РАДИОЛОКАЦИЯ

## НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ЦИФРОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

МИКРОСХЕМЫ И МОДУЛИ СВЧ

НАВИГАЦИОННО-СВЯЗНАЯ АППАРАТУРА

МИКРОСХЕМЫ ТИПА «СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ»

**125183, г. Москва,**
**проезд Черепановых, д. 54**
Телефон: +7 (499) 281-7057
Факс: +7 (499) 153-0161
E-mail: niima@mri-progress.ru

ПРОГРЕСС

**www.mri-progress.ru**

Организаторы

НИИМЭ НИИ молекулярной электроники

ПРОГРЕСС НИИ микроэлектронной аппаратуры

При поддержке

МИНПРОМТОРГ РОССИИ

Ростех

Генеральный партнер

Элемент

Стратегический партнер

ЭЛВИС

Отраслевой партнер

НИИЭТ

Финансовый партнер

ПСБ

Официальные партнеры

Baikal ELECTRONICS

ASTRA LINUX®

Спонсор открытия Форума

GEOSCAN

Спонсор торжественного приема

75 лет АО МосЭП

Инновационный партнер

ШТРИХ-М ГРУППА КОМПАНИЙ

IT-партнер

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ РУСБИТЕХ

Специальный партнер

ПРОМТЕХНИКА ИНВЕСТИЦИОННО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ГРУППА

Партнеры

АТБ ЭЛЕКТРОНИКА

Аэроб

Postec группа компаний

НИЯУ МИФИ КОНСОРЦИУМ ЭЛИС СПЕЙС

GEOSTAR NAVIGATION

Form

РЕАБИЛИТИК

Модуль НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

omega

Оператор Форума

ПроКонф

Генеральный информационный партнер

ТЕХНОСФЕРА РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

NANOINDUSTRY НАНОИНДУСТРИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА ТЕХНОЛОГИИ БИЗНЕС

Отраслевые информационные партнеры

АКРП Консорциум дизайн-центров

ТЕХНОПАРК САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

АССОЦИАЦИЯ РАЗРАБОТЧИКОВ И ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Информационно-аналитический Центр Современной Электроники