

# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

## **СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 4 (160) 2015

---

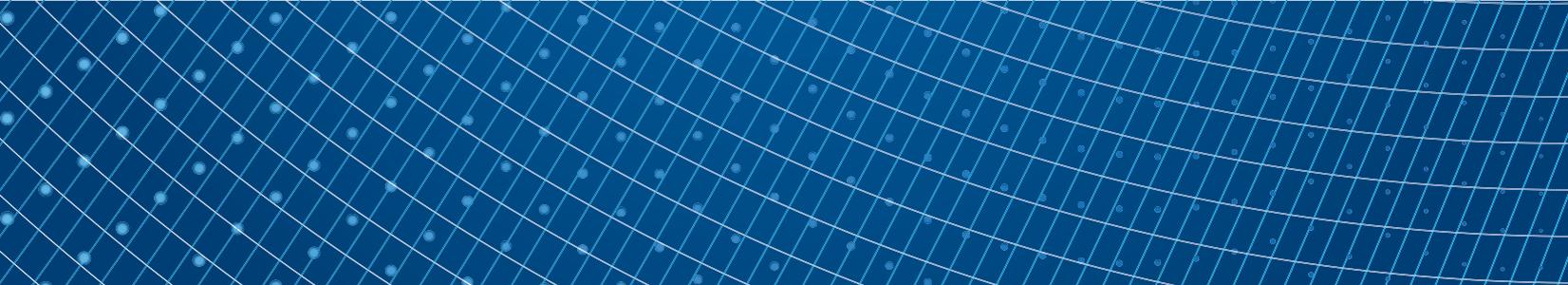
# **ELECTRONIC ENGINEERING**

## **SERIES 3 MICROELECTRONICS**

Scientific & technical journal

Issue 4 (160) 2015

Москва, 2015



## "ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"

### Редакционный совет Главный редактор

Красников Г.Я., д.т.н.,  
академик РАН

### Члены редакционного совета

Аристов В.В.,

член-корреспондент РАН

Асеев А.Л., д.ф.-м.н.,

академик РАН

Бетелин В.Б., д.ф.-м.н.,

академик РАН

Бокарев В.П., к.х.н.,

ответственный секретарь

Бугаев А.С., д.ф.-м.н.,

академик РАН

Быков В.А., д.т.н.

Галиев Г.Б., д.ф.-м.н.

Горбачевич А.А. д.ф.-м.н.,

член-корреспондент РАН

Горнев Е.С., д.т.н.,

зам. главного редактора

Грибов Б.Г., д.х.н.,

член-корреспондент РАН

Зайцев Н.А., д.т.н.

Ким А.К., к.т.н.

Критенко М.И., к.т.н.

Немудров В.Г., д.т.н.

Орликовский А.А., д.т.н.,

академик РАН

Петричкович Я.Я., д.т.н.

Сигов А.С., д.ф.-м.н., академик РАН

Стемпковский А.Л., д.т.н.,

академик РАН

Чаплыгин Ю.А., д.т.н.,

член-корреспондент РАН

Шелепин Н.А., д.т.н.,

зам. главного редактора

Эннс В.И., к.т.н.

### Адрес редакции

✉ 124460 г. Москва, Зеленоград,

1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal\_EEM-3@mikron.ru

🌐 www.mikron.ru/journal

Журнал издается с 1965 года

### Учредитель

АО "Научно-исследовательский  
институт молекулярной  
электроники"

## РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ

### РАЗРАБОТКА GAAS И SIGE СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, БИБЛИОТЕК ЭЛЕМЕНТОВ И МОДУЛЕЙ САПР В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Бабак Л.И., Черкашин М.В., Шеерман Ф.И., Добуш И.М., Коколов А.А., Сальников  
А.С., Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Горяинов А.Е., Жабин Д.А. .... 4–17

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕТЕРОДИНА

#### С ПЕТЛЕЙ ФАПЧ КУ-ДИАПАЗОНА

Баронов А.А., Шадский В.А. .... 18–22

### МИКРОЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ С-ДИАПАЗОНА

Брагарь А.П., Шадский В.А. .... 23–26

### СВЕРХМАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

Давидов Р.Г., Кирпиченков А.И. .... 27–31

### ТРАНЗИСТОРЫ ШОТКИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ С ЗАДАННЫМ ПОРОГОВЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ.

В.И. Гармаш, В.И. Егоркин, А.А. Зайцев, С.С. Шмелев. .... 32–34

### РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА

Кондукторов А.А., Кирпиченков А.И. .... 35–38

## ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА В СОВРЕМЕННОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.Д.Просий, С.О.Ранчин, Н.А.Шелепин .... 39–43

## СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

### ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЭФФЕКТ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛАЗМОЙ В КАНАЛЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

О.А. Клименко, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, Н.В. Дьяконова, В. Кнап. .... 44–51

### МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОНОВ И ПРИРОДА ЛОВУШЕК В ТОНКИХ СЛОЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКСИДА НА КРЕМНИИ ПОСЛЕ ПРОТЕКАНИЯ ЗАРЯДА

В.А. Гриценко, Д.Р. Исламов, О.М. Орлов, Г.Я. Красников, Морозов Е.Н. .... 52–61

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ FRAM И RERAM, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

О.М. Орлов, А.М. Маркеев, А.В. Зенкевич, К.В. Егоров, А.Г. Черникова. .... 62–68

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЯЧЕЙКЕ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ

П.С. Захаров, А.Г. Итальянцев .... 69–72

## НАДЕЖНОСТЬ

### АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПС СВЧ ДИАПАЗОНА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Кагирина К. А., Федоров Ю. В., Лаврухин Д.В., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Рубан О.А. .... 73–76

**"ELECTRONIC ENGINEERING. Series 3. MICROELECTRONICS"**

**Editorial Council  
Chief Editor**

**G.Ya. Krasnikov**, Sc.D.,  
Full Member of the RAS

**The Members  
of Editorial Council**

**V.V.Aristov**, Sc.D.,  
Corresponding Member of the RAS

**A.L.Aseev**, Sc.D.,  
Full Member of the RAS

**V.B.Betelin**, Sc.D.,  
Full Member of the RAS

**V.P.Bokarev**, Ph.D.,  
Responsible Secretary

**A.S.Bugaev**, Sc.D.,  
Full Member of the RAS

**V.A.Bykov**, Sc.D.  
**G.B.Galiev**, Sc.D.

**A.A.Gorbatsevich**, Sc.D.,  
Corresponding Member of the RAS

**E.S.Gornev**, Sc.D.,  
Deputy Chief Editor

**B.G.Gribov**, Sc.D.,  
Corresponding Member of the RAS

**N.A.Zaitsev**, Sc.D.  
**A.K.Kim**, Ph.D.

**M.I.Kritenko**, Ph.D.  
**V.G.Nemudrov**, Sc.D.

**A.A.Orlikovsky**, Sc.D.,  
Full Member of the RAS

**Ya.Ya.Petrichkovich**, Sc.D.  
**A.S.Sigov**, Sc.D.,

Full Member of the RAS  
**A.L.Stempkovskiy**, Sc.D.,

Full Member of the RAS  
**Y.A.Chaplygin**, Sc.D.,

Corresponding Member of the RAS  
**N.A.Shelepin**, Sc.D.,

Deputy Chief Editor  
**V.V.Enns**, Ph.D.

**Editorial Staff Address**

1-st Zapadny pr-d 12, str. 1.  
Zelenograd, Moscow, 124460, Russian  
Federation  
Phone: +7 (495) 229-70-43  
E-mail: journal\_EEM-3@mikron.ru  
<http://www.mikron.ru/journal>  
Journal was published from 1965 year

**Founder**

Joint-Stock Company "Molecular  
Electronic Research Institute"

**DEVELOPMENT AND DESIGNING**

**DEVELOPMENT OF GAAS AND SIGE MMICS, PROCESS DESIGN KITS, AND  
EDA MODULES AT TOMSK STATE UNIVERSITY OF CONTROL SYSTEMS AND  
RADIOELECTRONICS**

Babak L.I., Cherkashin M.V., Sheerman F.I., Dobush I.M., Kokolov A.A, Salnikov A.S.,  
Kalentyev A.A., Garays D.V., Goryainov A.E., Zhabin D.A..... 4-17

**DESIGN FEATURES OF THE LOCAL OSCILLATOR WITH A LOOP PLL KU-BAND**

Alexey A. Baronov, Vladimir A. Shadskiy..... 18-22

**C-BAND MICROELECTRONIC POLARIZATION SEPARATOR**

Bragar A.P., Shadskij V.A..... 23-26

**SUPER LOW NOISE AMPLIFIERS AND CONVERTERS FOR RADIO ASTRONOMY**

Davidov R. G., Kirpichenkov A.I..... 27-31

**GALLIUM NITRIDE BASED SCHOTTKY TRANSISTORS THRESHOLD  
VOLTAGE ADJUSTMENT**

Valentin I. Garmash, Vladimir I. Egorkin, Aleksey A. Zaytsev, Sergey S. Shemelev ..... 32-34

**THE EXTENSION OF X-BAND LOW NOISE AMPLIFIER DYNAMIC RANGE**

Aleksandr A. Konduktorov, Aleksandr I. Kirpichenkov..... 35-38

**PROCESSES AND TECHNOLOGY**

**QUALITY ASSURANCE IN MODERN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING**

A.Prosyi, S.Ranchin, N.Shelepin..... 39-43

**PROPERTIES OF MATERIALS**

**DIRECT CURRENT INFLUENCE ON TERAHERTZ RADIATION DETECTION BY  
2D ELECTRON PLASMA IN THE CHANNEL OF A FIELD EFFECT TRANSISTOR IN  
MAGNETIC FIELD**

Klimenko O.A., Mityagin Yu.A, Mursin V.N., Dyakonova N.V., Wojciech Knap ..... 44-51

**MECHANISM OF ELECTRON TRANSPORT AND TRAP NATURE IN THIN LAYERS  
OF THERMAL OXIDE ON SILICON AFTER CHARGE FLOWING**

Vladimir A. Gritsenko, Damir R. Islamov, Oleg M. Orlov, GennadyYa.Krasnikov,  
Evgeniy N. Morozov ..... 52-61

**RESEARCH FEATURES OF FRAM AND RERAM NON-VOLATILE MEMORY  
DEVICES BASED ON ALD PROCESSES**

Oleg M. Orlov, Andrey M. Markeev, Andrey V. Zenkevich, Konstantin V. Egorov, Anna  
G. Chernikova ..... 62-68

**MATHEMATICAL SIMULATION**

**TEMPERATURE CALCULATION FOR SILICA-BASED RESISTIVE MEMORY DEVICES**

P. S. Zakharov, A.G. Italyantsev..... 69-72

**RELIABILITY**

**STABILITY ANALYSIS OF MICROWAVE SIGNAL CONVERTERS UNDER EXTERNAL  
INFLUENCES**

Kseniya A. Kagirina, Yurii V. Fedorov, Denis V. Lavruhin, Dmitry L. Gnatuk, Alexander  
V. Zuev, Oleg A. Ruban ..... 73-76

# РАЗРАБОТКА GaAs И SiGe СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, БИБЛИОТЕК ЭЛЕМЕНТОВ И МОДУЛЕЙ САПР В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

► Л.И.Бабак, М.В.Черкашин, Ф.И.Шеерман, И.М.Добуш,  
А.А.Коколов, А.С.Сальников, А.А.Калентьев,  
Д.В.Гарайс, А.Е.Горяинов, Д.А.Жабин  
ТУСУР

Рассматривается выполненный в Томском университете систем управления и радиоэлектроники комплекс исследований и разработок в области создания GaAs и SiGe СВЧ монолитных интегральных схем, библиотек элементов и модулей САПР. Представлено краткое описание разработанных методов и программных продуктов для автоматизации измерений, построения моделей активных и пассивных элементов, а также проектирования СВЧ МИС. Приведены характеристики разработанных библиотек элементов, а также СВЧ МИС на основе отечественных и зарубежных GaAs- и SiGe-технологий, включая малошумящие усилители, усилители мощности, смесители и управляющие устройства.

## DEVELOPMENT OF GaAs AND SiGe MMICS, PROCESS DESIGN KITS, AND EDA MODULES AT TOMSK STATE UNIVERSITY OF CONTROL SYSTEMS AND RADIOELECTRONICS

L.I.Babak, M.V.Cherkashin, F.I.Sheerman, I.M.Dobush, A.A.Kokolov, A.S.Salnikov,  
A.A.Kalentyev, D.V.Garays, A.E.Goryainov, D.A.Zhabin  
TUSUR

The research in the area of development of GaAs and SiGe MMICs, process design kits (PDKs), and EDA modules that carried out at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics is presented. The techniques and software tools for the measurement automation, active and passive elements' model building, and MMIC design (synthesis) are described. Characteristics of PDKs (element model libraries) as well as GaAs/SiGe MMICs developed are considered including low noise and power amplifiers, mixers, and control circuits.

## ВВЕДЕНИЕ

Деятельность по разработке СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), библиотек элементов МИС, а также модулей САПР ведется в Научно-образовательном центре "Нанотехнологии" (НОЦ НТ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). НОЦ НТ функционирует в ТУСУРе с 2009 года. Основными областями исследований и разработок НОЦ НТ являются: развитие технологий СВЧ МИС на основе гетероструктурных GaAs и GaN материалов; проектирование и зондовые измерения GaAs/GaN/SiGe СВЧ МИС; разработка программного обеспечения (ПО) для автоматизированного проектирования и управления измерениями СВЧ МИС. Кроме того, в НОЦ НТ ведется деятельность по подготовке кадров высшей квалификации и специалистов в этих областях. В состав НОЦ НТ входят технологический участок, участок измерений СВЧ МИС, дизайн-центр по проектированию СВЧ МИС, лаборатория разработки программного обеспечения, а также инженерный участок обеспечения.

На **технологическом участке** развернута пилотная технологическая линия по изготовлению СВЧ-транзисторов и МИС на основе GaAs и GaN, состоящая из современного оборудования для нанолитографии, электронно-лучевого напыления, нанесения фоторезиста, контроля пластин и фотошаблонов в видимом и УФ диапазонах излучения и др. Линия позволяет выполнять цикл основных технологических операций изготовления активных элементов (формирование затвора и др). Остальные операции изготовления СВЧ-транзисторов и МИС выполняются на производственных технологических линиях предприятий-партнеров ТУСУРа в г. Томске. Основным элементом пилотной линии НОЦ НТ является нанолитограф Raith-150 Two с разрешением до 20 нм, что позволяет изготавливать СВЧ-транзисторы с шириной затвора менее 100 нм и граничными частотами свыше 100 ГГц.

На **участке измерений СВЧ МИС** развернута автоматизированная установка для измерений и характеристики МИС и элементов до частот 40–50 ГГц. Она представляет собой специализированный аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий измерения СВЧ-устройств и компонентов на полупроводниковой пластине с использованием зондовой станции. Комплекс используется для решения двух основных задач:

- оценка характеристик готовых СВЧ МИС и функциональных элементов на пластине;
- характеристики элементов СВЧ МИС, то есть получение набора экспериментальных данных, позволяющих полностью описать свойства функционального элемента и построить на этой основе его математическую модель. Установка управляется программным обеспечением (в том числе собственной разработки) и содержит следующее основное оборудование:
  - три зондовых станции фирмы Cascade Microtech для измерения характеристик МИС и элементов на СВЧ и постоянном токе (диаметр пластин до 200 мм);
  - два векторных анализатора цепей компаний Keysight Technologies (серия ENA) и Rohde&Schwarz (ZWA);
  - анализатор спектра (Keysight Technologies) с возможностью измерения шумовых характеристик;
  - генератор гармонических СВЧ-сигналов (Keysight Technologies);
  - два программируемых тюнера (Focus) с возможностью настройки по трем гармоникам сигнала;
  - модули для реализации импульсного режима измерений и др.

Кроме того, сотрудники НОЦ НТ имеют доступ к векторному анализатору цепей серии PNA-X (Keysight Technologies), что дает возможность измерять широкий круг разнообразных характеристик СВЧ МИС и компонентов, включая X-параметры в режиме большого сигнала.

Указанный автоматизированный комплекс обеспечивает измерение большого набора параметров активных и пассивных компонентов МИС в различных режимах работы: статических характеристик (ВАХ), параметров рассеяния, шумовых и мощностных характеристик, формы и спектральных составляющих сигнала и др., реализует автоматические load-pull измерения (измерения при изменении импедансов нагрузок активных элементов) и измерения в импульсном режиме. Это позволяет, в частности, полностью характеризовать СВЧ-транзисторы и тем самым определять полный набор шумовых параметров маломощных транзисторов, находить оптимальные нагрузочные импедансы по основной и высшим гармоникам для реализации высокоэкономичных режимов мощных приборов, верифицировать нелинейные и шумовые модели активных элементов и т. д.

**Дизайн-центр** ведет деятельность в следующих направлениях:

- проектирование и разработка СВЧ МИС и систем на кристалле (СнК) на основе отечественных и зарубежных GaAs/GaN/SiGe технологий, включая мал шумящие усилители (МШУ), усилители мощности (УМ), смесители, генераторы, управляемые напряжением (ГУН), управляющие устройства и др.;
- разработка моделей пассивных и активных элементов СВЧ МИС, включая нелинейные и шумовые модели СВЧ-транзисторов;
- разработка библиотек моделей для различных технологий изготовления СВЧ МИС, которые интегрируются в коммерческие САПР.

Для проектирования СВЧ МИС в дизайн-центре используются программные продукты Microwave Office, ADS, Cadence и др. Имеется лицензия на программы Software Development Kit (SDK) и Model Wizard, позволяющие осуществить построение и интеграцию моделей элементов МИС в систему Microwave Office. Кроме того, используются собственные оригинальные программные продукты для проектирования СВЧ МИС и построения моделей элементов.

Направления деятельности **лаборатории разработки программного обеспечения:**

- создание ПО для автоматизации управления зондовыми измерениями СВЧ МИС;
- разработка ПО для автоматизированного построения моделей пассивных и активных СВЧ-компонентов, включая элементы СВЧ МИС;
- разработка интеллектуального ПО для автоматизированного проектирования СВЧ-устройств и МИС, включая автоматическую генерацию (синтез) схем и топологий согласующих цепей и усилителей.

## 1. ИЗМЕРЕНИЯ, СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ И БИБЛИОТЕК ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ МИС

### Измерение параметров элементов СВЧ МИС

Процесс измерения характеристик СВЧ МИС и функциональных элементов отличается большой сложностью ввиду высоких рабочих частот и трудности доступа к элементам с весьма малыми размерами. При этом высокоточные измерения требуются не только для оценки результирующих характеристик МИС

и функциональных элементов, но главным образом для построения достоверных моделей этих элементов. Особенности СВЧ-измерений являются: необходимость калибровки измерительной установки для исключения систематических ошибок (влияние потерь и переотражений в кабелях, разъемах, переходах и т.д., несовпадение плоскостей отсчета измеряемого устройства с плоскостями измерений и др.); необходимость исключения влияния контактных площадок и других измерительных элементов на результаты измерений (деэмбеддинг). В связи с трудоемкостью процедур СВЧ-измерений, в том числе калибровки и деэмбеддинга, они должны быть автоматизированы. Автоматизация целесообразна также в том случае, когда требуется многократное повторение однотипных измерений. Например, при построении нелинейной модели СВЧ-транзистора необходимо выполнить измерение его параметров рассеяния во многих рабочих точках по постоянному току. Важными задачами при большом объеме измерений являются сбор, хранение, обработка и анализ результатов.

В НОЦ ИТ для решения указанных задач разработаны и разрабатываются программные модули, интегрированные с аппаратной частью измерительного комплекса [1]:

- программа Measurement (управление процессом измерений, автоматизированное измерение ВАХ и параметров рассеяния полупроводниковых приборов в нескольких режимах по постоянному току);
- программа Deembedding (исключение влияния контактных площадок);
- программы DataBase и Statistics (хранение, систематизация и статистический анализ результатов измерений с применением специализированной базы данных; находятся в разработке).

На основе указанного выше измерительного оборудования и ПО разработаны, освоены и верифицированы методики, обеспечивающие:

- зондовые векторные измерения до 50 ГГц: а) с использованием калибровочных мер на измерительной подложке; б) с использованием калибровочных мер непосредственно на полупроводниковой пластине;
- векторные измерения в коаксиальном тракте до 26 ГГц: а) с использованием калибровочных мер на измерительной плате; б) на основе построения модели контактного устройства с разъемами.

## Разработка моделей элементов GaAs и GaN СВЧ МИС

Для проектирования СВЧ-устройств на основе монокристаллических технологий необходимы точные математические модели элементов МИС. Этот вопрос особенно актуален при разработке МИС на базе отечественных технологий. Создание моделей базируется на высокоточных измерениях, физическом или электромагнитном (ЭМ) моделировании характеристик СВЧ-элементов.

В НОЦ НТ осуществляется построение следующих типов моделей активных и пассивных элементов для конкретных технологий изготовления СВЧ МИС:

- физико-технологические и ЭМ-модели;
- компактные линейные, нелинейные и шумовые модели (т.е. модели в виде эквивалентных схем);
- поведенческие (формальные) модели в виде нейронных сетей, многомерных аппроксимирующих функций и др.

Физическое моделирование элементов МИС в НОЦ НТ осуществляется с помощью программной системы Sentaurus TCAD Synopsys [2]. При использовании этого пакета выполнено моделирование характеристик различных конструкций GaAs и GaN НЕМТ наногетероструктур, а также мощных СВЧ-транзисторов на их основе. Это позволило определить пути оптимизации конструкций гетероструктур и транзисторов, улучшения их характеристик. Результаты моделирования подтверждены экспериментальным измерением параметров изготовленных тестовых транзисторов.

Для моделирования пассивных компонентов СВЧ МИС в большинстве случаев используется более быстрое ЭМ-моделирование, основанное на численном решении уравнений электродинамики (программы Axiem, Momentum и др.). Физическое и ЭМ-моделирование элементов МИС требуют больших затрат машинного времени. Поэтому результаты такого моделирования совместно с данными измерений используются для построения других типов моделей, более эффективных с точки зрения использования в САПР СВЧ-устройств.

В частности, гораздо более быстродействующими и экономичными по сравнению с физическими моделями являются модели в виде эквивалентных схем (ЭС-модели). При построении такой модели СВЧ-компонента необходимо решить две задачи: выбор (синтез) структуры

ЭС и расчет параметров (экстракция) элементов ЭС. Особый интерес для проектирования СВЧ МИС представляют параметрические ЭС-модели, в которых учитываются зависимости характеристик компонента от конструктивных параметров (например, геометрических размеров) и/или внешних условий (температура, накопленная доза радиации и т.п.).

Для построения моделей СВЧ-компонентов, как правило, применяется специализированное программное обеспечение (например, IC-CAP и др.). Однако данные САПР обладают высокой стоимостью. Кроме того, процедуры выбора структуры модели и экстракции элементов ЭС часто являются сложными и времязатратными.

В связи с этим в НОЦ НТ разработаны оригинальные методики построения моделей пассивных и активных СВЧ-элементов, которые реализованы в собственных программных продуктах:

- аналитические и численно-аналитические процедуры экстракции параметров ЭС и построения параметрических моделей пассивных СВЧ-компонентов – полупроводниковых и тонкопленочных резисторов, МДМ-конденсаторов, спиральных катушек индуктивности и др. [3, 4] (реализованы в программном модуле Extraction-P);
- новая методика экстракции параметров малосигнальной модели MESFET и НЕМТ транзистора с учетом нелинейного характера сопротивления стока, позволяющая повысить точность моделирования малосигнальных S-параметров в различных рабочих точках [5] (реализована в программном модуле Extraction-L).

Наиболее сложным является построение нелинейных ЭС-моделей СВЧ-транзисторов. В литературе, как правило, отсутствует подробное описание методик экстракции параметров распространенных видов таких моделей, а строятся они с использованием дорогостоящего ПО (IC-CAP, AmCAD) и оптимизационных методов. В НОЦ НТ для GaAs и GaN НЕМТ транзисторов на основе аналитических и численных процедур разработана полностью формализованная методика экстракции всех 68 параметров нелинейной модели ЕЕНЕМТ, в том числе с учетом нелинейного сопротивления стока. Построение модели осуществляется на основе измеренных статических ВАХ и малосигнальных S-параметров транзистора. Для ее верификации используется сравнение рассчитанных на большом сигнале

нагрузочных (load pull) диаграмм и амплитудных характеристик транзистора с данными измерений.

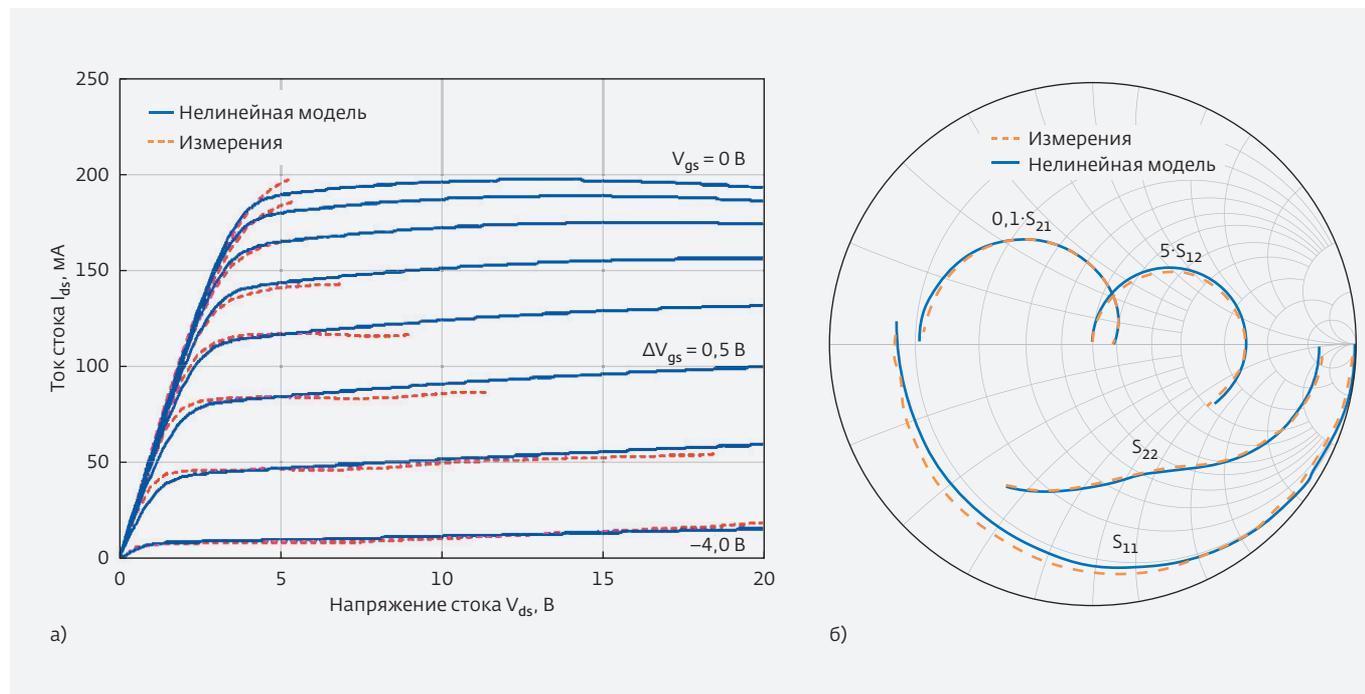
Для иллюстрации точности этой методики на рис.1 и 2 представлены результаты сравнения рассчитанных с помощью построенной нелинейной модели ЕЕНЕМТ и измеренных характеристик отечественного 0,15 мкм GaN НЕМТ транзистора с общей шириной затвора  $W_g = 4 \times 100$  мкм.

Поведенческие модели представляют СВЧ-компонент в виде "черного ящика" без учета его физической природы. Такие модели также быстродействующие, однако, в отличие от физических и ЭС-моделей, процедуры их построения гораздо проще, являются универсальными (т.е. не зависят от типа компонента) и могут быть формализованы (автоматизированы). Поведенческие модели строятся на основе как непосредственных измерений, так и физического или ЭМ-моделирования характеристик компонента. С математической точки зрения построение параметрической поведенческой модели является задачей многомерной аппроксимации. В качестве входных (независимых) переменных выступают изменяемые параметры компонента СВЧ МИС (частота, конструктивные параметры, напряжения смещения и т.д.), в качестве

выходных (зависимых) – моделируемые характеристики, например, параметры рассеяния.

В НОЦ НТ разработаны, исследованы и реализованы в виде ПО методики построения нескольких разновидностей поведенческих моделей активных и пассивных СВЧ-элементов, в том числе моделей в виде искусственных нейронных сетей (ИНС), многомерных полиномов и сплайнов, а также моделей на основе детерминированного алгоритма интерполяции функций с неравномерной сеткой данных (метод обратного средневзвешенного расстояния – ОСР) [6]. На этой основе построены поведенческие модели пассивных и линейных активных элементов МИС для отечественных GaAs- и GaN-технологий, характеризующиеся достаточной точностью и быстродействием. При этом метод ОСР позволяет значительно (до 500 раз) сократить время построения поведенческой модели относительно получившего распространение метода ИНС при сравнимой точности и быстродействии модели.

Так как процедуры экстракции нелинейных ЭС-моделей СВЧ-транзисторов весьма сложны и трудоемки, для преодоления этой трудности разработаны алгоритмы построения поведенческих (универсальных табличных) моделей произвольных нелинейных приборов (транзисторов)



**Рис.1.** Характеристики 0,15 мкм GaN НЕМТ транзистора (измерение и моделирование): а) выходные ВАХ; б) малосигнальные S-параметры в диапазоне 0,1–40 ГГц при  $V_g = -3,25$  В,  $V_{ds} = 15$  В,  $I_{ds} = 35$  мА

на основе многомерных сплайнов [7]. Эти модели позволяют одновременно описать измеренные малосигнальные параметры рассеяния приборов в широком диапазоне частот и режимов по постоянному току, ВАХ и нелинейные (мощностные, спектральные) характеристики в заданном диапазоне входных воздействий, процедуры их построения автоматизированы.

Указанные выше программные модули включены в состав системы INDESYS-MS (Intelligent Design System – Measurement Suite) для управления СВЧ-измерениями и построения моделей СВЧ-компонентов. Эффективность разработанных методик и ПО для построения моделей подтверждена при создании библиотек элементов МИС для гетероструктурных GaAs- и GaN-технологий.

### Разработка библиотек элементов для GaAs- и GaN-технологий изготовления СВЧ МИС

Успешное проектирование СВЧ МИС возможно только при условии создания библиотек элементов (точнее, библиотек электрических и топологических моделей элементов МИС), отражающих особенности технологии изготовителя, и интеграции этих библиотек в распространенные системы моделирования СВЧ-устройств.

Разработка библиотеки является актуальной задачей при организации опытного и промышленного выпуска СВЧ МИС на базе отечественных технологий. При этом библиотека элементов позволяет наиболее просто передать сведения о технологии проектировщикам МИС как внутри предприятия-изготовителя интегральных схем, так и сторонним организациям. Построение библиотек – сложная и трудоемкая научно-практическая задача, требующая наличия высокоточного измерительного оборудования и специализированного программного обеспечения, знаний и опыта в области СВЧ-измерений, математического моделирования и проектирования СВЧ МИС.

Зарубежные организации-изготовители СВЧ МИС, ориентированные на решение технологических задач, собственными силами либо в сотрудничестве с разработчиками САПР целенаправленно проводят работу по созданию и поддержанию в актуальном состоянии библиотек элементов. Однако на российских предприятиях деятельность по разработке и всесторонней верификации библиотек элементов для отечественных GaAs- и GaN-технологий СВЧ МИС не развита. Полноценные библиотеки элементов, пригодные для передачи сторонним

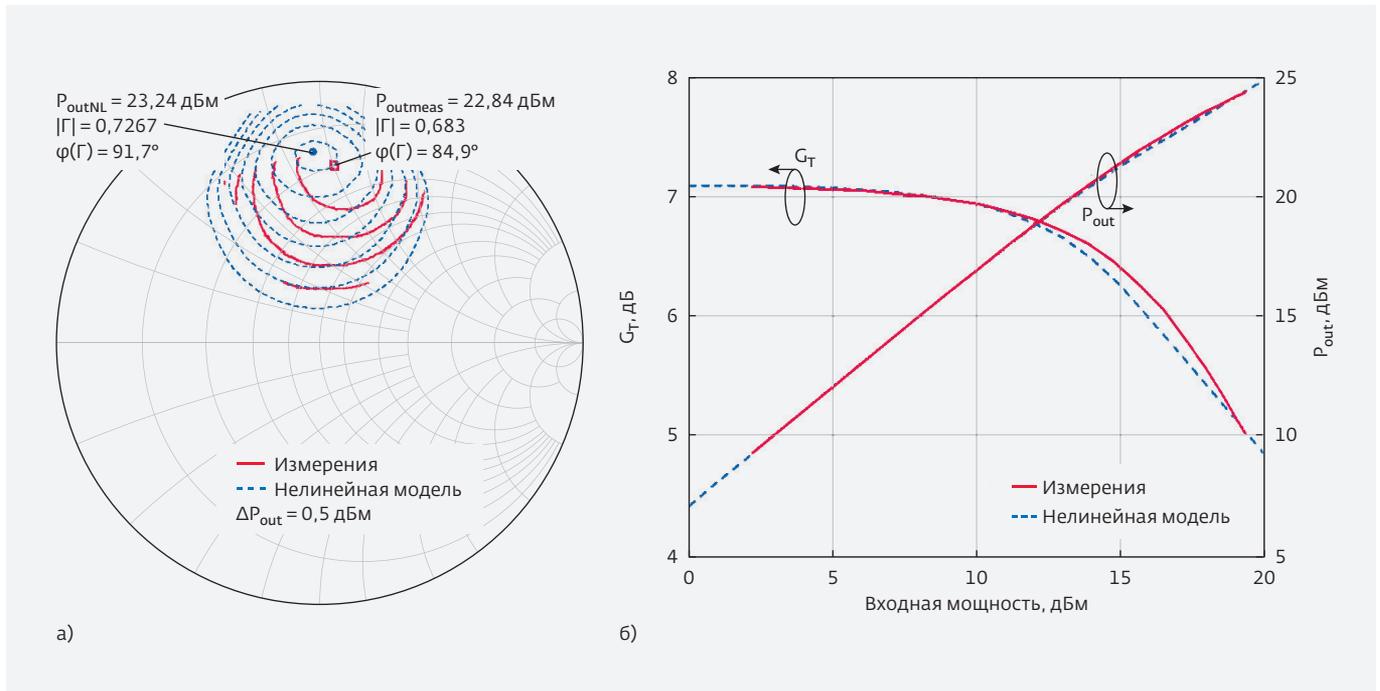


Рис.2. Большесигнальные характеристики 0,15 мкм GaN НЕМТ транзистора на частоте 23 ГГц (измерение и моделирование): а) нагрузочные диаграммы; б) коэффициент усиления и выходная мощность

организациям-проектировщикам, практически отсутствуют, это не позволяет на современном уровне организовать разделение труда между разработчиками и изготовителями СВЧ МИС.

В НОЦ НТ на систематической основе разрабатываются библиотеки элементов гетероструктурных СВЧ МИС и имеется соответствующее лицензионное программное обеспечение. На базе проведенных исследований и полученного опыта была предложена и практически опробована методика создания библиотек элементов СВЧ МИС, изготовленных по GaAs- и GaN-технологиям [8]. Основными объектами библиотеки элементов являются взаимосвязанные электрическая модель, топология, трехмерное представление для ЭМ-анализа, справочная информация и дополнительные параметры. Топология

и электрическая модель СВЧ-элемента автоматически изменяются при изменении его геометрических параметров. Такие библиотеки позволяют в полной мере использовать все возможности современных САПР и значительно ускорить и упростить процесс проектирования СВЧ МИС. В НОЦ НТ освоена, исследована и развита методика построения топологических моделей (ячеек) в САПР Microwave Office, базирующаяся на применении программных продуктов Software Development Kit (SDK) и Model Wizard фирмы Applied Wave Research [8]. С целью построения параметризованных топологических моделей для всех типов монолитных элементов реализуются и интегрируются в среду Microwave Office программные модули на языке C++, описывающие набор стандартных геометрических

**Таблица 1.** Характеристики библиотеки элементов для 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии

№п/п	Наименование элемента	Группа элементов	Тип элемента (модели)	Максимальное СКО модели в группе, %
1	NL (4 модели)	Nonlinear	Транзисторы (нелинейная модель)	ВАХ – 10,9 S-параметры – 11,7
2	A (10 моделей)	Small Signal	Транзисторы (малосигнальная модель)	3,77–5,43
3	SW1 (5 моделей)	Switch HEMT	Транзисторы (модель в ключевом режиме)	Закр. режим – 5,9 Откр. режим – 1,7
4	VIA, DCPAD, RFPORT	Interconnects	Сквозное отверстие в подложке, контактные площадки для DC и RF	
5	MLIN, MTRACE... (12 моделей)	Microstrips	Отрезок линии передачи, изгибы, тройники, скачок ширины линии и другие неоднородности линии передачи	Не оценивалась
6	MIMCAP	Passive	Масштабируемая модель МДМ-конденсатора	4,27
7	TFRES	Passive	Масштабируемая модель тонкопленочного резистора	1,71
8	W_S_T_ (8 моделей)	Inductors	Модели фиксированной квадратной спиральной катушки индуктивности	7,5
9	SQRIND	Inductors	Масштабируемая модель квадратной спиральной индуктивности	5,3 до частоты первого резонанса
10	DICE	Substrate	Рамка кристалла	Служебный элемент
11	MSUB	Substrate	Подложка	Служебный элемент

примитивов и зависимости их размеров от геометрических параметров. Модели позволят в реальном масштабе времени отображать топологию и создавать фотошаблоны МИС.

Сотрудниками НОЦ НТ были разработаны библиотеки для GaAs- и GaN-технологий ряда отечественных организаций, в том числе 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии ОАО НИИПП (г. Томск), 0,25 мкм GaN NEMT технологии ОАО НИИПП, 0,13 мкм GaAs mHEMT технологии ИСВЧПЭ РАН (г. Москва), 0,35 мкм GaAs гетероструктурной технологии ЗАО НПФ "Микран" (г. Томск). Библиотеки разработаны для коммерческой САПР Microwave Office в частотном диапазоне до 40 ГГц. В качестве примера в табл.1 сведены основные характеристики библиотеки элементов для 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии. Для представленных в таблице элементов разработаны разные виды электрических моделей, а также топологические модели; если не указано иначе, приведена среднеквадратичная ошибка (СКО) S-параметров моделей.

Разработанные библиотеки элементов использовались при проектировании СВЧ МИС на основе GaAs- и GaN-технологий.

## 2. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (СИНТЕЗА) СВЧ-ЦЕПЕЙ И УСТРОЙСТВ

Современные САПР, предназначенные для проектирования СВЧ-устройств (например, ADS, Microwave Office, Genesys и др.) решают только задачи моделирования, то есть расчета характеристик по уже заданной принципиальной схеме и топологии устройства. Выбор схемы и топологии МИС осуществляется на основе эвристического подхода с использованием опыта разработчика, упрощенных инженерных методик расчета, методом проб и ошибок и т.д. Обычным является применение многократного моделирования различных вариантов схем и топологий при разных сочетаниях параметров элементов, а также многократной оптимизации МИС. Такой процесс проектирования СВЧ МИС является длительным, трудоемким, не гарантирует наилучших результатов и требует дефицитных квалифицированных кадров.

В НОЦ НТ в течение ряда лет разрабатываются методы, алгоритмы и ПО для автоматизированного выбора (генерации, синтеза)

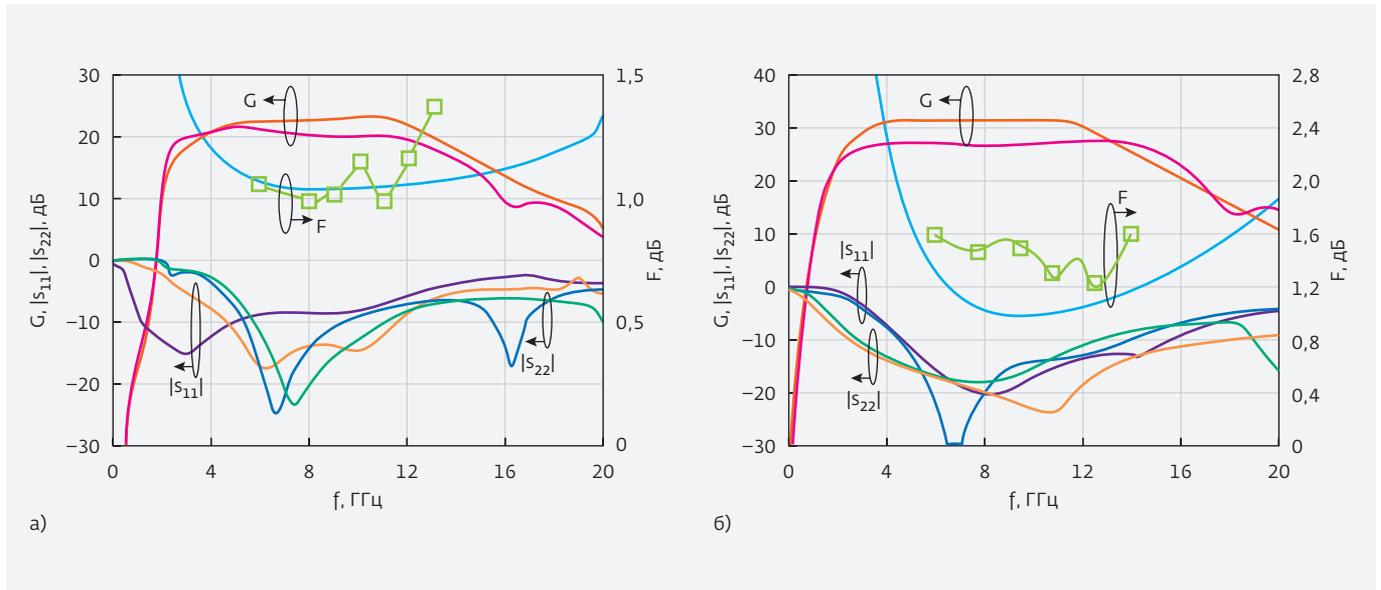
принципиальных схем и топологий линейных, малошумящих и мощных транзисторных СВЧ-усилителей, а также пассивных согласующих (СЦ), корректирующих (КЦ) цепей и фильтров. В основу решения задачи положен ряд предложенных новых подходов, в том числе декомпозиционный метод синтеза активных полупроводниковых СВЧ-устройств, оригинальные интерактивные процедуры "визуального" проектирования пассивных цепей на базе технологии "визуальных вычислений", автоматический синтез пассивных и активных СВЧ-цепей на основе генетических алгоритмов (ГА) и др. [9-17]. Для повышения эффективности проектирования сочетаются принципы искусственного интеллекта, а также интерактивные "визуальные" процедуры, объединяющие интеллектуальные способности человека и вычислительные возможности компьютера.

На базе указанных подходов разработано ПО, которое используется для автоматизированного проектирования (синтеза) СВЧ-цепей и устройств [11-17]:

- Microwave Look – пакет программ, позволяющий осуществить проектирование широкополосных и узкополосных линейных, малошумящих и мощных транзисторных СВЧ-усилителей по комплексу требований к усилению, форме АЧХ, шуму, выходной мощности, согласованию и устойчивости. Пакет основан на интерактивном "визуальном" подходе к проектированию усилителей с двухполюсными и реактивными четырехполюсными КЦ (ЧКЦ). Он включает следующие совместимые между собой программы: Locus (программа визуального проектирования пассивных КЦ и СЦ); Locus-MMIS (интегрированная программная среда для "визуального" проектирования согласующих и корректирующих цепей СВЧ МИС; функционирует совместно с системой Microwave Office); Atp (программа визуального проектирования СВЧ-усилителей с двухполюсными цепями коррекции и обратной связи); Region (программа визуального проектирования СВЧ-усилителей с реактивными ЧКЦ на входе и выходе).
- Genesyn – программа автоматического синтеза СЦ, КЦ и фильтров на основе ГА. Обеспечивает проектирование реактивных и диссипативных цепей лестничной структуры на сосредоточенных и распределенных элементах при произвольной форме частотной характеристики передачи мощности и при комплексных импедансах генератора и нагрузки.

Таблица 2. Технические характеристики МИС широкополосных усилителей

№	Тип усилителя	Технология	Организация	А/Гц	G, дБ	F, дБ	P <sub>out</sub> , дБм	S <sub>11</sub>  , дБ;  S <sub>22</sub>  , дБ
МИС усилителей на основе GaAs-технологии								
1	МШУ (проект)	0,15 мкм GaAs рHEMT	Win	1,2...1,8	27±0,5	1,3	–	–9,5; –10
2	МШУ	0,18 мкм GaAs рHEMT	ОММИС	2...10	11,7±1,1	2,15	13	–9,5; –11,5
3	МШУ	0,15 мкм GaAs рHEMT	Win	3...20	10,7±0,7	2,6	10,5/ 18 ГГц	–10; –9,8
4	МШУ	0,15 мкм GaAs рHEMT	ИСВЧПЭ	9...12	15±1,0	2,3	6	–10; –8
5	МШУ	0,15 мкм GaAs рHEMT	ИСВЧПЭ	6...12	20±1,0	< 1,4 дБ (4^8.. 12ГГц)	7	–7,5; –10
6	МШУ	0,15 мкм GaAs рHEMT	ИСВЧПЭ	6...12	28±1,0	< 1,6 дБ (4^8.. 12ГГц)	7	–10; –12
7	МШУ	0,1 мкм GaAs mHEMT	ОММИС	27...31	20±1,0	1,7	–	–12; –12
8	МШУ	0,15 мкм GaAs рHEMT	ИСВЧПЭ	30...40	16,8±1,4	2,3 (моделир.)	–	–8; –8
9	Линейный	0,13 мкм GaAs mHEMT	ИСВЧПЭ	34...38	9±1,0	–	7	–9; –5
10	Линейный	0,13 мкм GaAs mHEMT	ИСВЧПЭ	33...38	20±0,5	–	6	–10; –6
11	Линейный	0,15 мкм GaAs рHEMT	Win	33...47	13±0,8	–	–	–6; –6
12	УМ	0,15 мкм GaAs рHEMT	Win	9...12	13,9±1,4	–	19,2/ 10 ГГц	–12,5; –14,5
13	УМ	0,15 мкм GaAs рHEMT	Win	26...37	9.3±1,7	–	21,7/ 37 ГГц	–7,5; –6
МИС усилителей на основе SiGe-технологии								
14	МШУ (проект)	0,25 мкм SiGe BiCMOS	–	1,3...1,7	17±0,25	1,5	–19,5	–8; –10
15	МШУ (проект)	0,25 мкм SiGe BiCMOS	–	1...4	15 ±0,5	4,7	–1,3	–9; –13



**Рис.3.** Комплект МИС МШУ диапазона 6–12 ГГц: а) характеристики двухкаскадного МШУ (моделирование – пунктирная линия, измерения – сплошная линия); б) характеристики трехкаскадного МШУ; в) топология трехкаскадного МШУ (размер 2,4×1,4 мм)

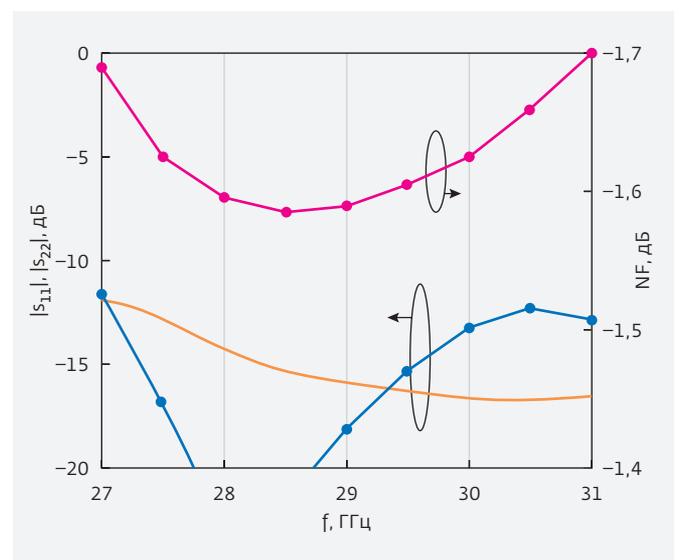
• Geneatr – программа автоматического синтеза транзисторных СВЧ-усилителей на основе ГА. Обеспечивает проектирование широкополосных и узкополосных линейных и маломощных усилителей по комплексу характеристик. При проектировании СВЧ МИС программы обеспечивают следующие возможности:

- 1) позволяют в автоматическом или интерактивном режиме синтезировать принципиальную схему устройства по поставленным требованиям при учете полного комплекса характеристик;
- 2) обеспечивают полный контроль схемы и значений элементов синтезируемых устройств;
- 3) разрешают учесть на этапе синтеза потери и паразитные параметры монолитных интегральных элементов;
- 4) осуществляют экспорт полученных решений в САПР Microwave Office. Разработанные программы представляют собой модули, расширяющие возможности коммерческой САПР, и при взаимодействии с системой Microwave Office позволяют также автоматически сгенерировать первоначальный вариант топологии СВЧ-устройства [18].

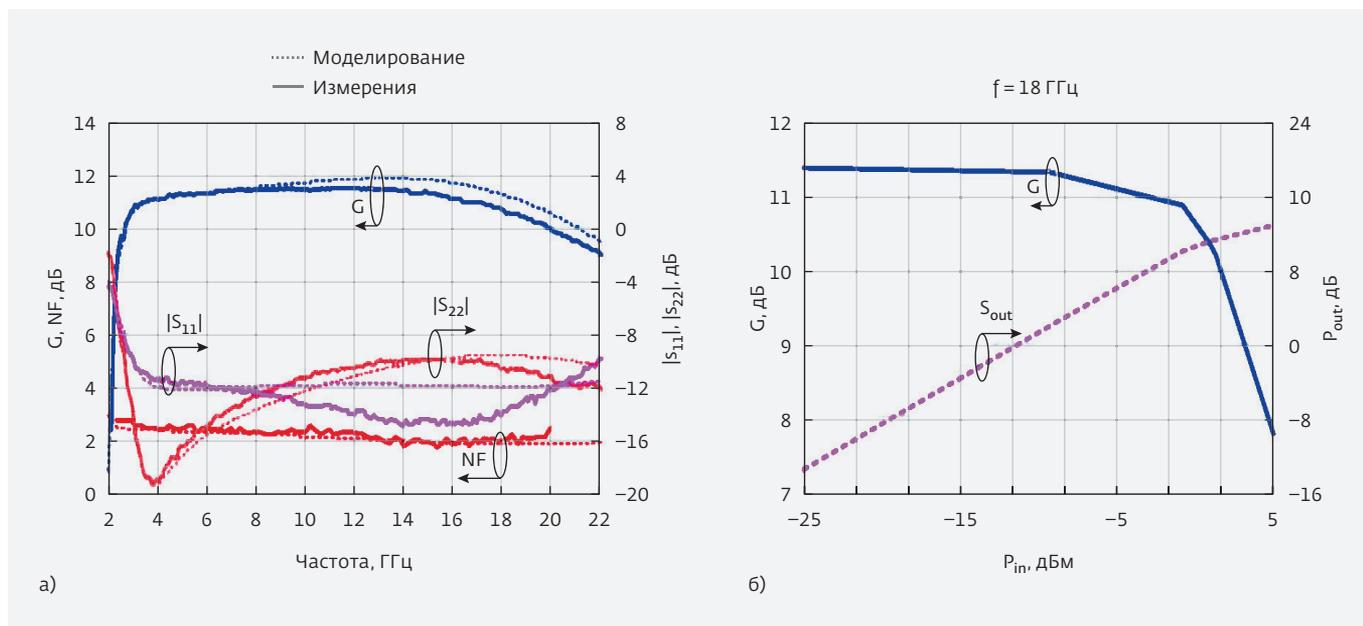
Перечисленное ПО было успешно применено при разработке МИС усилителей и других СВЧ-устройств. Оно позволило значительно облегчить и сократить время проектирования, повысить качественные показатели устройств.

### 3. РАЗРАБОТКА СВЧ МИС НА ОСНОВЕ GaAs-ТЕХНОЛОГИЙ

Коллектив сотрудников НОЦ НТ имеет многолетний опыт в разработке полупроводниковых СВЧ-устройств для радиоэлектронных устройств и систем различного назначения. При этом в рамках проектов с отечественными и зарубежными организациями разработано значительное



**Рис.4.** Характеристики шума и согласования МИС МШУ диапазона 27–31 ГГц



**Рис.5.** Характеристики МИС МШУ диапазона 3–20 ГГц (размер 1,3 × 0,7 мм<sup>2</sup>): а) частотные характеристики (моделирование и измерения); б) зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от входной мощности на частоте 18 ГГц (измерения)

число МИС в частотных диапазонах от 1 до 47 ГГц на основе GaAs-технологий, прежде всего – МИС МШУ и УМ. Основные характеристики МИС широкополосных усилителей приведены в табл.2. Опытные партии МИС изготавливались на технологической базе организации ИСВЧПЭ РАН (г. Москва), компаний ОММИС (Франция) и Win Semiconductors (Тайвань).

Выделим следующие практические разработки на базе отечественных монокристаллических технологий изготовления СВЧ МИС. На основе 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии ИСВЧПЭ РАН совместно с этой организацией и НПФ "Микран" в 2007 году разработана и изготовлена одна из первых в России гетероструктурных МИС МШУ X-диапазона с коэффициентом шума 2,3 дБ (табл.2, №4). На основе этой же технологии выпущен комплект МИС двух- и трехкаскадных МШУ диапазона 6–12 ГГц с характеристиками на уровне лучших зарубежных образцов [19] (табл.2, №5 и №6, рис.3). Коэффициент шума разработанных усилителей равен 1,4–1,6 дБ, в то время как у их аналогов – МИС МШУ TGA2511, TGA2512, HMC564 и HMC565 фирм Triquint и Hittite (США) он составляет от 1,5 до 2,3 дБ.

На основе 0,13 мкм GaAs mHEMT технологии ИСВЧПЭ РАН изготовлен комплект монокристаллических копланарных усилителей диапазона 30–37 ГГц (табл.2, №9 и №10) [20].

Ряд монокристаллических СВЧ-усилителей был разработан совместно с зарубежными организациями в рамках совместных проектов по программам INTAS. Монокристаллический сверхширокополосный МШУ диапазона частот 2–10 ГГц разработан вместе с исследовательским институтом XLIM Лиможского университета на основе 0,18 мкм GaAs pHEMT технологии ED02AH фирмы ОММИС, Франция [13] (табл.2, №2). Монокристаллический трехкаскадный МШУ диапазона 27–31 ГГц для системы космической связи разработан совместно с институтом XLIM и Французским космическим агентством CNES на основе 0,1 мкм GaAs mHEMT технологии D01MN фирмы ОММИС [21] (табл.2, №7, рис.4). Его особенностями являются низкий коэффициент шума (1,7 дБ), а также выполнение одновременно фильтрующих функций, что позволяет снизить требования к другим блокам системы. Схемы СЦ и КЦ были синтезированы с помощью программы Genesyn.

Несколько МИС МШУ и УМ были спроектированы и изготовлены по 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии компании Win Semiconductors (табл. 2, №3, 11–13). На рис.5 показаны измеренные частотные характеристики, а также зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от входной мощности для МИС МШУ диапазона 3–20 ГГц.

Таблица 3. Параметры ЦАТТ (моделирование)

Частотный диапазон, ГГц	1–4,5
Разрядность, бит	5
Диапазон ослабления, дБ	31
Шаг ослабления, дБ	1
Потери в опорном состоянии, дБ	2,9
Максимальная ошибка ослабления для основных состояний ЦАТТ, дБ	$\pm 0,3$
$ S_{11} ,  S_{22} $ дБ	-15
Паразитная фазовая конверсия, град.	$\pm 2,5$
$P_{вх\ 1дБ}$ , дБм	15
ИП <sub>3</sub> , дБм	33
Напряжение управления, В	0/2,5
Размер, мм <sup>2</sup>	1,16 × 0,3

Таблица 4. Параметры смесителя (моделирование)

Частотный диапазон ВЧ, ГГц	1–4,5
Частотный диапазон ПЧ, ГГц	0,05–0,5
Коэффициент преобразования, дБ	$-9 \pm 0,5$
Коэффициент шума, дБ	9,5
Развязка "Вход гетеродина – ВЧ", дБ	>40
Коэффициент отражения по входу ВЧ, дБ	-10
Коэффициент отражения по гетеродину, дБ	-6
Мощность гетеродина, дБм	13–15
$P_{вх\ 1дБ}$ , дБм	10–13
ИП <sub>3</sub> , дБм	19–22
Размер, мм <sup>2</sup>	1,74 × 0,6

#### 4. РАЗРАБОТКА СВЧ МИС НА ОСНОВЕ SIGE-ТЕХНОЛОГИЙ

В 2015 году в НОЦ НТ начаты работы по проектированию СВЧ МИС для универсального многодиапазонного приемника (L-, S- и C-диапазоны) в виде "системы на кристалле" (СнК). К настоящему времени на базе 0,25 мкм SiGe-технологии спроектированы МИС следующих широкополосных СВЧ-устройств (частотный диапазон 1–4,5 ГГц): МШУ, смеситель, цифровой управляемый аттенюатор (ЦАТТ), а также схема управления ЦАТТ. Последнее устройство обеспечивает управление аттенюатором по параллельному или последовательному интерфейсам.

Результаты моделирования МШУ приведены в табл.2 (№ 15), а остальных устройств – в табл. 3 и 4. В данный момент изготовление указанных МИС запущено на фабрике. После отработки топологии устройств они будут объединены на одном кристалле, образуя СнК.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен выполненный в НОЦ "Нанотехнологии" ТУСУРа комплекс исследований и разработок в области создания GaAs и SiGe

СВЧ монолитных интегральных схем, библиотек элементов и модулей САПР. Представлено краткое описание разработанных методов и программных продуктов для автоматизации измерений, построения моделей активных и пассивных элементов, а также проектирования СВЧ МИС. Приведены характеристики разработанных библиотек элементов, а также СВЧ МИС на основе отечественных и зарубежных GaAs- и SiGe-технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Добуш И.М., Степачева А.В., Сальников А.С., Кокотов А.А, Самуилов А.А., Бабак Л.И.** Программы для автоматизации измерений, деэмбеддинга и построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов // 21-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2011): Материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 214–215.
2. **Торхов Н.А., Бабак Л.И., Божков В.Г., Разжувалов А.Н., Сальников А.С.** Физическое моделирование мощных НЕМТ на основе GaN/AlGaN наногетероструктур // Доклады ТУСУР. 2012.

- № 2 (26). Ч. 2. С.145–151. (ISSN 1818–0442).
3. **Горяинов А.Е., Степачева А.В., Добуш И.М., Бабак Л.И.** Программа для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012). Севастополь, 10–14 сентября 2012 г.: Материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. Т. 1. С. 129–130.
  4. **Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И.** Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P // Доклады ТУСУР. 2012. № 2 (26). Ч. 2. С. 98–103.
  5. **Коколов А.А., Торхов Н.А., Добуш И.М., Бабак Л.И.** Экспериментальное исследование и моделирование GaN НЕМТ Ка-диапазона на подложке SiC // Изв. вузов. Физика. № 8/3, г. Томск, 2013 г. С. 116–120. (ISSN 0021–3411).
  6. **Сальников А.С.** Исследование поведенческих моделей элементов СВЧ МИС // 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь, 2–7 сентября 2014 г.: Матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2010. Т. 1. С.119–120.
  7. **Дмитриенко К.С., Бабак Л.И.** Построение табличной нелинейной модели рНЕМТ-транзистора // 19-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2009). Севастополь, 2009 г.: Матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2009. Т. 1. С. 119–120.
  8. **Шеерман Ф.И., Бабак Л.И.** Создание библиотек моделей элементов СВЧ монолитных интегральных схем для системы Microwave Office // 19-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2009). Севастополь, 2009 г.: Матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2009. Т. 1. С. 107–108.
  9. **Babak L.I.** Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Sym. Dig., vol. 2, Phoenix, AZ, May 2001, pp. 1167–1170.
  10. **Бабак Л.И.** Структурный синтез СВЧ полупроводниковых устройств на основе декомпозиционного подхода // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8. С. 160–165.
  11. **Babak L.I., Cherkashin M.V., Sheyerman F.I., Fedorov Yu.V.** Design of Multistage Low-Noise Amplifiers Using "Visual" CAD Tools. – IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – Baltimore, USA. June 2011. P. 1–4.
  12. **Бабак Л.И., Черкашин М.В., Зайцев Д.А.** Программа "визуального" проектирования корректирующих и согласующих цепей СВЧ устройств // 15-я Межд. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2005): материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2005. Т. 2. С. 423–424.
  13. **Cherkashin M.V., Eyllier D., Babak L.I., Billonnet L. and al.** Design of a 2–10 GHz feedback MMIC LNA using "visual" technique / Proc. 35th European Microwave Conf. Proc., Paris, France, October, 2005. PP. 1153–1156.
  14. **Бабак Л.И., Черкашин М.В., Поляков А.Ю., Бодунов К.С., Дягилев А.В.** Программы "визуального" проектирования транзисторных СВЧ усилителей // 15-я Межд. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2005): матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2005. Т. 2. С. 425–426.
  15. **Бабак Л.И., Вьюшков В.А.** Программа синтеза согласующих цепей на основе генетического алгоритма // 16-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2006): Матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2006. Т. 1. С. 209–210.
  16. **Babak L.I., Kokolov A.A., Kalentyev A.A., Garays D.V.** A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis // Proceedings of the 7th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMW 2012), Oct. 2012, Amsterdam, The Netherlands, P. 381–384.
  17. **Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Бабак Л.И., Коколов А.А., Добуш И.М.** Структурный синтез свч транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием параметрических моделей монолитных элементов // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Кры-МиКо'2012). Севастополь, 10–14 сентября 2012 г.: Матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. Т. 1. С. 131–132.
  18. **Калентьев А.А., Добуш И.М., Жабин Д.А., Гарайс Д. В., Бабак Л.И.** Методика автоматизированного синтеза СВЧ МШУ с учетом особенностей топологии // 25-я Международ-

- ная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6-12 сентября 2015 г.
19. **Мокеров В.Г., Бабак Л.И., Федоров Ю.В., Черкашин М.В., Шеерман Ф.И. и др.** Разработка комплекта монолитных маломощных усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии // Доклады ТУСУР. – 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 105-117.
  20. **Бабак Л.И., Федоров Ю.В., Черкашин М.В. и др.** Копланарные монолитные усилители Ka-диапазона на основе 0,13 мкм GaAs mHEMT технологии // Доклады ТУСУР. 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 20-24.
  21. **Арменго В., Лапорт К., Джарри Б., Бабак Л.И., Черкашин М.В. и др.** Монолитный маломощный усилитель диапазона 27-31 ГГц с фильтрующими свойствами для системы космической связи // 19-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2009). Севастополь, 2009 г.: Матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2009. Т. 1. С. 47-48.

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕТЕРОДИНА С ПЕТЛЕЙ ФАПЧ Ku-ДИАПАЗОНА

► А.А.Баронов, В.А.Шадский  
ЗАО "Микро-ВИС"

В работе рассмотрены три варианта построения генератора СВЧ с петлей ФАПЧ Ku-диапазона. Выработаны критерии выбора оптимальной конструкции в зависимости от фазовых шумов ГУН.

## DESIGN FEATURES OF THE LOCAL OSCILLATOR WITH A LOOP PLL KU-BAND

A.A. Baronov, V.A. Shadskiy  
JSC "Micro-WIS"

The paper considers three variants of construction of the microwave oscillator with PLL Ku-band. Developed selection criteria for the optimum design depending on phase noise VCO.

В современных системах спутниковой связи широко используется Ku-диапазон частот. Приемные системы строятся по супергетеродинному принципу. Входящий сигнал преобразуется в L-диапазон для последующей обработки. Одним из критериев качества цифровой связи является вероятность появления битовой ошибки. Влияние гетеродина на величину ошибки можно оценить через среднеквадратическое отклонение фазового шума ( $s_{\text{ФШ}}$ ). Для нормального функционирования приемника гетеродин должен обладать высокой стабильностью и низкой спектральной плотностью фазовых шумов. Разные схемы построения гетеродина позволяют получить разные по форме профили спектральной плотности мощности фазовых шумов, но близкие по величине  $s_{\text{ФШ}}$ . В работе рассматриваются вопросы проектирования генератора для супергетеродинного приемника Ku-диапазона с выходной частотой 10 ГГц, предложено три варианта построения, проанализированы достоинства и недостатки каждого варианта.

Генераторы с петлей фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), спроектированные на основе современной элементной базы, характеризуются достаточно низким уровнем спектральной плотности фазовых шумов, обладают малыми массогабаритными характеристиками. Типичная схема генератора с петлей ФАПЧ приведена на рис.1.

Принцип функционирования генератора с петлей ФАПЧ. Генератор, управляемый напряжением (ГУН), вырабатывает сигнал СВЧ, близкий к заданной частоте. Для получения требуемой выходной частоты и ее стабилизации используется петля обратной связи. Часть энергии отводится на частотно-фазовый детектор (ЧФД), в котором происходит сравнение с сигналом от опорного генератора (ОГ). В качестве ОГ широко используется кварцевый генератор. Перед ЧФД сигнал от ГУН

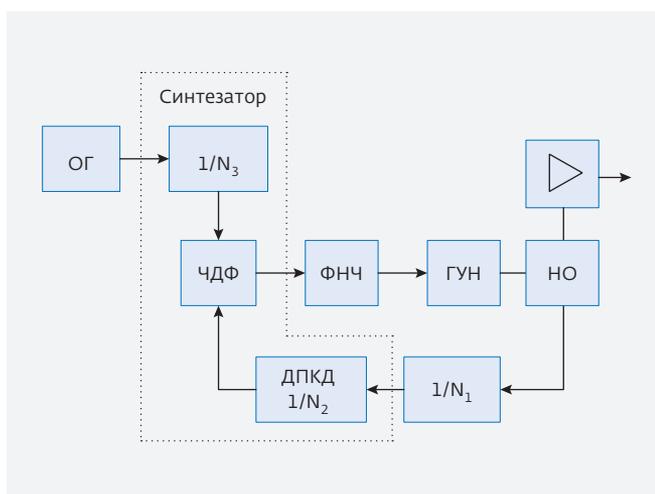


Рис.1. Структурная схема генератора с петлей ФАПЧ:  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  – коэффициенты деления; НО – направленный ответвитель

переносится на более низкие частоты с помощью делителя частоты с фиксированным коэффициентом деления  $N_1$ , а также с помощью делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД)  $N_2$  в составе синтезатора. Делитель с фиксированным коэффициентом деления  $N_1$  может быть отдельной интегральной схемой, или входить в состав либо ГУН, либо синтезатора. Последний вариант характеризуется наименьшим током потребления. В результате сравнения сигналов ЧФД вырабатывает разностное напряжение, которое является управляющим для ГУН. На выходе ЧФД образуется постоянное и переменное напряжение. Для фильтрации переменной составляющей перед управляющим входом ГУН ставят фильтр низких частот (ФНЧ). ФНЧ определяет полосу захвата петли ФАПЧ.

Гетеродин с петлей ФАПЧ представляет собой сложную систему автоматического регулирования с обратной связью, работа которой может быть описана в соответствии с теорией управления [1]:

$$K(p) = G(p) / (1 + G(p) \cdot H), \quad (1)$$

$$G(p) = (K_{\text{ЧФД}} \cdot K_0 \cdot K_{\text{ФНЧ}}) / p, \quad (2)$$

$$H = 1/N, \quad (3)$$

где  $G(p)$  – коэффициент передачи в прямом направлении;  $H$  – коэффициент передачи петли обратной связи;  $p = j \cdot \omega$  – оператор Лапласа;  $K_{\text{ФНЧ}}$  – коэффициент передачи фильтра;  $K_0$  – крутизна перестройки ГУН, Гц/В;  $K_{\text{ЧФД}}$  – крутизна ЧФД, мА/рад,  $N$  – коэффициент деления частоты ГУН.

Относительно полосы захвата все источники шума в соответствии с их передаточными функциями по отношению к выходу системы можно разделить на две группы: внеполосные (ГУН) и внутриполосные источники (ОГ, внешний делитель частоты, ЧФД и делитель частоты в составе синтезатора). Профиль результирующих фазовых шумов системы можно рассчитать исходя из пересчета фазовых шумов отдельных источников к выходу гетеродина с учетом передаточных характеристик и нахождения их среднеквадратического значения [1]:

$$L(f) = 10 \lg \left[ (U_{\text{ОГ}} \cdot G_{\text{ОГ}}(p))^2 + (U_{\text{синт}} \cdot G_{\text{синт}}(p))^2 + (U_{\text{ГУН}} \cdot G_{\text{ГУН}}(p))^2 \right], \quad (4)$$

$$G_{\text{ОГ}}(p) = G(p) / (1 + G(p) \cdot H), \quad (5)$$

$$G_{\text{синт}}(p) = (1/K_{\text{ЧФД}}) \cdot (G(p) / (1 + G(p) \cdot H)), \quad (6)$$

$$G_{\text{ГУН}}(p) = 1 / (1 + G(p) \cdot H), \quad (7)$$

где  $L(f)$  – кривая спектральной плотности результирующих фазовых шумов;  $U_{\text{ОГ}}$ ,  $U_{\text{синт}}$ ,  $U_{\text{ГУН}}$  – шумовые напряжения ОГ, синтезатора и ГУН;  $G_{\text{ОГ}}(p)$ ,  $G_{\text{синт}}(p)$ ,  $G_{\text{ГУН}}(p)$  – передаточные функции для ОГ, синтезатора и ГУН.

На кривой спектральной плотности фазовых шумов (рис.2-1) можно условно выделить три области по частоте отстройки:

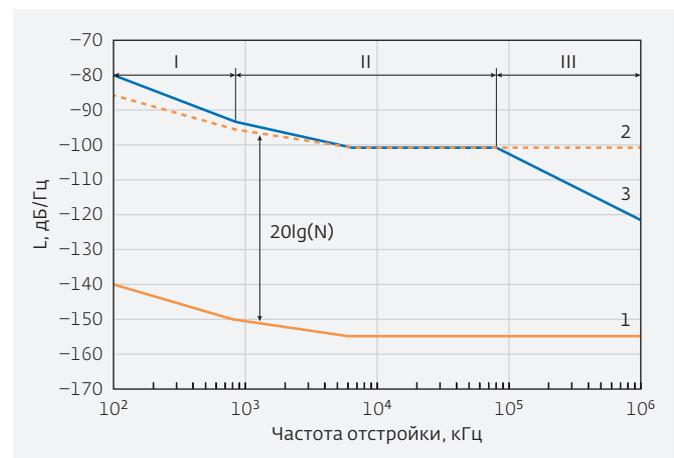
I – область доминирующего влияния преобразованных шумов опорного генератора и фликкершумов выходных усилителей,

II – область пересчитанных к выходу системы шумов синтезатора и ОГ,

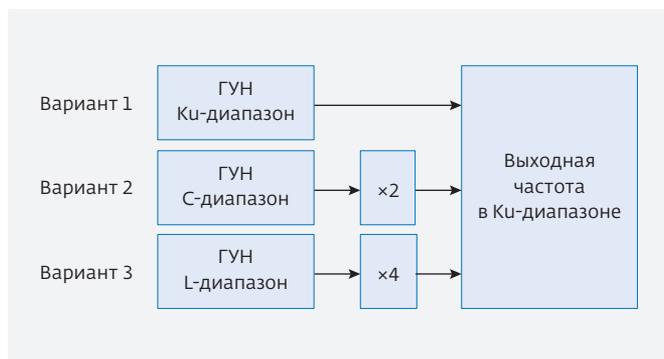
III – область, определяемая шумами ГУН.

Первые две области определяются внутриполосными источниками шума, а третья – внеполосными.

Источники шума, доминирующие в каждой из областей, могут оказывать существенное влияние на смежные области. Каждая область осуществляет вклад в среднеквадратическое отклонение фазового шума [2-4]. На основе интегрального параметра – среднеквадратического отклонения фазового шума – возможно сравнение конструкций, имеющих разные кривые фазовых шумов. Уменьшение среднеквадратического отклонения фазового шума возможно либо за счет снижения



**Рис.2.** Кривые спектральной плотности фазовых шумов для генератора с петлей ФАПЧ: 1 – фазовые шумы опорного генератора, 2 – пересчитанные к выходной частоте фазовые шумы опорного генератора, 3 – шумы генератора с петлей ФАПЧ



**Рис.3.** Варианты формирования частоты генератора в Ku-диапазоне

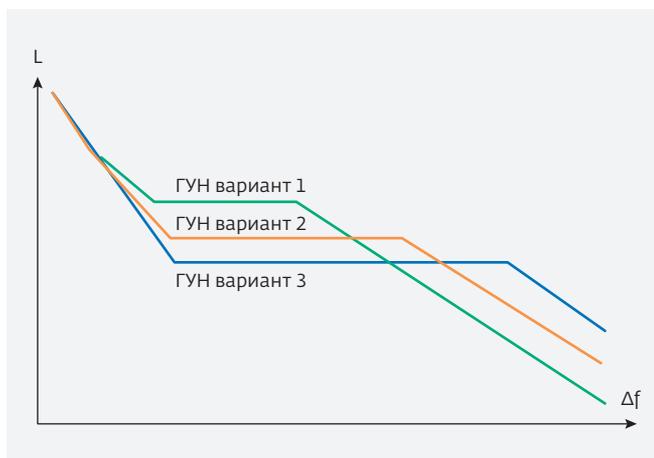
всего уровня шумов, либо за счет уменьшения ширины областей I и II.

Для получения частоты в Ku-диапазоне можно воспользоваться тремя способами формирования выходной частоты (рис.3). Все три варианта базируются на однопетлевой ФАПЧ. Принципиальное отличие заключается в частоте сигнала, сформированного ГУН, и коэффициенте умножения для получения заданной частоты. В работе для формирования опорного сигнала использовались термостатированные кварцевые генераторы фирмы ОАО "Морион" с частотой генерации 25 и 100 МГц.

Критерием оптимальности конструкции в пределах каждого варианта выбрана величина среднеквадратического отклонения фазового шума. При проектировании генераторов ставилось целью достижение близких по величине значений среднеквадратического отклонения фазового шума:  $S_{ФШ1} \approx S_{ФШ2} \approx S_{ФШ3}$ . На рис.4 представлены кривые спектральной плотности мощности фазового шума, соответствующие трем вариантам построения генераторов. Основные характеристики ГУН разных частотных диапазонов сведены в табл.1.

Отличительной особенностью первого варианта является соответствие частоты ГУН выходной частоте генератора. Структурная схема такого генератора совпадает с представленной на рис.1. Конструктивное исполнение ГУН Ku-диапазона – монолитная интегральная схема (МИС). Исходя из существующей выпускаемой номенклатуры можно выделить два варианта исполнения ГУН:

- без встроенного делителя частоты; характерен малый ток потребления, большой фазовый шум при отстройке на 10 и 100 кГц (вариант 1а, табл.1); необходимость использования внешнего делителя (ток потребления не более 90 мА);



**Рис.4.** Кривые спектральной плотности мощности фазового шума генераторов

- со встроенным делителем частоты на 2 и 4; характерен большой ток потребления, низкий фазовый шум при отстройке на 100 кГц (вариант 1б, см. таблицу).

Вариант ГУН (1а) имеет преимущество по току потребления, однако существенно уступает по уровню фазовых шумов.

В первом варианте фазовые шумы ГУН при отстройке на 10 кГц накладывают ограничения в выборе полосы захвата петли ФАПЧ. Полоса захвата более 100 кГц позволяет уменьшить влияние ГУН в ближней зоне (кривая 1, рис.4). На выходе генератора фазовые шумы при отстройке 100 кГц будут определяться внутриполосными источниками, то есть преимущественно синтезатором. В системе ФАПЧ попытка устранить влияния высоких шумов ГУН при отстройке на 10 кГц приводит к невозможности воспользоваться преимуществом низких фазовых шумов ГУН при отстройке на 100 кГц. Генератор спроектирован с использованием синтезатора с уровнем нормализованных фазовых шумов (-233) дБ/Гц. Для достижения среднеквадратического отклонения фазового шума, сравнимого со значениями генераторов варианта 2 и 3, выбран более высокочастотный ОГ с меньшим уровнем фазовых шумов, большим током потребления и большими массогабаритными характеристиками. Среднеквадратическое отклонение фазового шума гетеродина не превышает 0,6°.

К достоинствам данной схемы можно отнести относительно простую структуру, к недостаткам – высокое энергопотребление. Внешний вид генератора приведен на рис.5.

Характеристики ГУН

Вар. №	Наименование	Вариант исполнения	Ток потребления при $U_{пит} = 5 \text{ В, мА}$	Уровень спектральной плотности фазовых шумов при отстройке, дБ/Гц	
				10 кГц	100 кГц
1а	ГУН Ку-диапазона	Полупроводниковая МИС без делителя частоты	270	-63	-90
1б	ГУН Ку-диапазона	Полупроводниковая МИС с делителем частоты	60	-85	-115
2	ГУН С-диапазона	Микросборка	40	-103	-126
3	ГУН L-диапазона	Микросборка	30	-116	-136

Второй и третий вариант построения генератора Ку-диапазона подразумевают использование ГУН С-диапазона и L-диапазона. ГУН этих диапазонов производятся в полупроводниковом исполнении и в виде микросборок. Преимущество полупроводниковых ГУН – в малых габаритах, а микросборок ГУН – в малом токе потребления и низком уровне фазовых шумов. Выполняются такие ГУН на коаксиальном резонаторе типа КРП 4,0×4,5 (ООО "Керамика"). Внешний вид второго варианта приведен на рис.6, варианта 3 – на рис.7. Фазовые шумы и ток потребления для ГУН С-диапазона и L-диапазона приведены в таблице. Уровень фазовых шумов при транспонировании частоты ГУН в Ку-диапазон можно рассчитать по формуле [1]:

$$L_{гетер}(f) = L_{ФАПЧ}(f) + 20 \cdot (N), \quad (8)$$

где  $L_{гетер}(f)$  – кривая спектральной плотности фазовых шумов гетеродина;  $L_{ФАПЧ}(f)$  – кривая спектральной плотности фазовых шумов ФАПЧ без умножения;  $N$  – коэффициент умножения.

По формулам 7 и 8 пересчитываем фазовые шумы ГУН из таблицы к выходу гетеродина. ГУН L-диапазона имеет преимущество над остальными при отстройке на 100 кГц. Выигрыш варьируется от 4 до 34 дБ.

Низкие фазовые шумы ГУН в третьем варианте позволяют проектировать генератор посредством формирования третьей области (рис.2). Полоса захвата рассчитывается узкой, менее 10 кГц



Рис.5. Генератор Ку-диапазона на основе ГУН Ку-диапазона

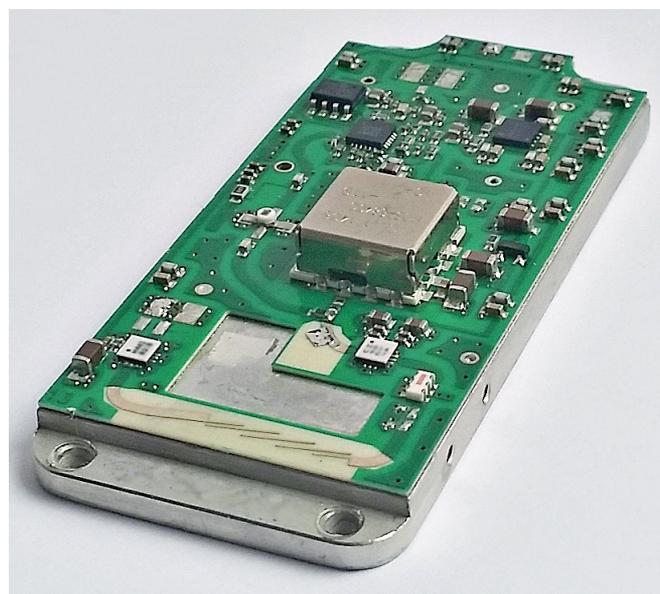
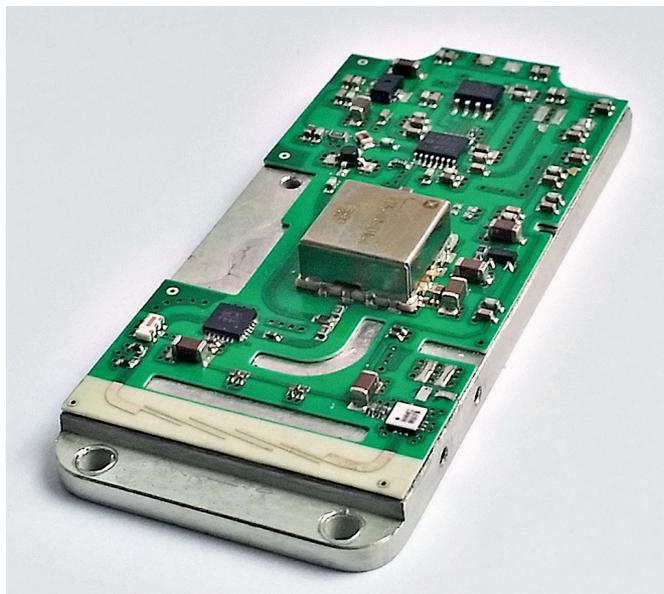


Рис.6. Генератор Ку-диапазона на основе ГУН С-диапазона



**Рис.7.** Генератор Ку-диапазона на основе ГУН L-диапазона

(кривая 3, рис.4). Это ведет к снижению требований к фазовым шумам синтезатора и опорного генератора. На рис.6 реализован генератор, в состав которого входит синтезатор частоты с нормализованными фазовыми шумами (-223) дБ/Гц. Среднеквадратическое отклонение фазового шума гетеродина не превышает 0,5°.

Во втором варианте был выбран синтезатор с нормализованными фазовыми шумами (-233) дБ/Гц. Рассчитана более широкая полоса захвата (кривая 2, рис.4). Среднеквадратическое отклонение фазового шума гетеродина не превышает 0,6°.

К недостаткам второго и третьего варианта следует отнести наличие на выходе гетеродина гармоник кратных частоте ГУН и не кратных выходной частоте гетеродина. Присутствие нечетной гармоники, кратной ГУН L-диапазона приводит к переносу паразитного сигнала в область промежуточных частот или близкую к ней. Формируется помеха. Избежать формирования мощной помехи, влияющей на работу демодулятора, возможно, применив нескольких цепей фильтрации.

## ВЫВОДЫ

1. Выбор ГУН с меньшими фазовыми шумами способствует уменьшению энергопотребления, позволяет использовать более простые узлы

ФАПЧ и, как следствие, уменьшать себестоимость изделия. При этом массогабаритные характеристики ГУН принимают второстепенное значение.

2. В зависимости от выбранного ГУН рассчитывается оптимальная полоса захвата, при этом задача сводится к достижению среднеквадратического отклонения фазового шума, удовлетворяющего требованиям надежности передачи информации с данным видом модуляции.
3. Проектирование генераторов в Ку-диапазоне с частотой ГУН, совпадающей с выходной частотой гетеродина и низкими фазовыми шумами, сопряжено с высоким током потребления.
4. Ограничение требований при разработке гетеродина требованиями исключительно к форме кривой профиля фазовых шумов может привести к созданию конструкции с увеличенной себестоимостью, повышенным энергопотреблением и увеличенными массогабаритными характеристиками. Более гибким требованием к гетеродинам является среднеквадратическое отклонение фазового шума.

Авторы считают, что в данной работе новым является положение об использовании величины среднеквадратического отклонения фазового шума в качестве критерия оптимальности разработанной конструкции гетеродина и в качестве обязательного требования к гетеродину взамен или совместно с традиционным требованием к профилю фазовых шумов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Banerjee D.** PLL Performance, Simulation and Design, Fourth Edition. – Indianapolis, Indiana: Dog Ear Publishing LLC, 2006. P. 344.
2. **Pelliccio J.R., Bachmann H., Myers B.W.** Phase Noise Effects on OFDM Wireless LAN Performance // APPLIED MICROWAVE & WIRELESS, 2000, vol. 13, № 7. PP. 68–80.
3. **Grebenkemper C.J.** Local Oscillator Phase Noise and its Effect on Receiver Performance. Technical Note. Vol. 8, № 6, November/December. Watkins-Johnson Company. 2001. [Электронный документ] – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu>. Дата обращения: 20.12.13
4. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. С. 1104.

# МИКРОЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ С-ДИАПАЗОНА

► А.П.Брагарь, В.А.Шадский  
ЗАО "Микро-ВИС"

Представлено микроэлектронное устройство разделения поляризации, позволяющее восстанавливать сигналы круговой и линейной поляризации в С-диапазоне с развязкой по кросс-поляризации во всем рассматриваемом диапазоне частот не хуже 27 дБ. Приведена функциональная схема микроэлектронного устройства разделения поляризации.

## C-BAND MICROELECTRONIC POLARIZATION SEPARATOR

A.P.Bragar, V.A.Shadskij  
JSC "Micro-VIS"

Compact microelectronic C-band polarization separator that recovers circular and line polarized signals with cross-polarization suppression more than 27dB across C-band is presented.

## ВВЕДЕНИЕ

Растущие объемы передаваемой информации и тенденции к повышению эффективности использования частотного спектра требуют усовершенствования средств и методов приема и передачи сигналов. Расширение спектра, занимаемого передаваемым сигналом, приводит к уплотнению используемой полосы частот и не может происходить бесконечно. Для эффективного использования частотного диапазона применяют различные методы уплотнения сигналов, к которым относятся частотное уплотнение, пространственное разделение источников и приемников сигналов, временное уплотнение, различные виды кодирования, а также поляризационное уплотнение сигналов. Именно последнее позволяет реализовать двойное использование частоты, при котором в одной полосе частот будет передаваться в два раза больше информации по сравнению с системами без уплотнения. Кроме того, данный метод может легко сочетаться с другими способами повышения эффективности использования частотного спектра.

Сигналы, используемые в системах спутниковой связи и вещания, поляризованы, и для их приема необходимы специальные устройства разделения поляризации. Значение электрических характеристик таких приборов во многом определяет

добротность всей приемной системы, а недостаточное значение развязки по поляризации автоматически приводит к ухудшению соотношения сигнал-шум, так как проникающий в таком случае сигнал кросс-поляризации является шумом по отношению к принимаемому сигналу. В зависимости от характеристик приемной и передающей антенн, а также от вида кодирования сигналов к устройствам разделения поляризации предъявляются различные требования по значению развязки. Наиболее неблагоприятным случаем является полное совпадение полос частот двух ортогонально поляризованных сигналов. При условии одинаковой мощности двух принимаемых сигналов в зависимости от вида кодирования для подавления сигнала кросс-поляризации требуется не менее 20 дБ, в реальных условиях необходимый уровень развязки по поляризации должен составлять не менее 30 дБ. Перестраиваемые волноводные устройства разделения поляризации (УРП), как правило, устанавливают на вход приемного тракта, и для уменьшения вносимых потерь конструктивно объединяют с облучателем антенны [1, 2]. Такие устройства, в зависимости от конструкции позволяют восстанавливать сигналы с линейной, круговой и эллиптической поляризацией. Габаритные размеры и вес таких устройств обратно пропорционален рабочей частоте и в С-диапазоне

частот может достигать десятков килограммов при длине более метра. Эти обстоятельства сильно затрудняют возможность использования таких устройств в многолучевых и мобильных системах спутниковой связи и вещания. Стоит отметить, что волноводные перестраиваемые устройства разделения поляризации обладают большим энергопотреблением, связанным с необходимостью управления электродвигателями в механизме привода фазовращателей, что, наряду с большим весом, не позволяет использовать их в передвижных приемных станциях.

**Целью работы** является создание компактного микроэлектронного УРП в качестве альтернативы волноводному УРП в С-диапазоне частот. Благодаря определенным конструктивным решениям микроэлектронное устройство разделения поляризации (МУРП) позволяет выделять ортогональные сигналы линейной, круговой и эллиптической поляризации с развязкой по кросс-поляризации не хуже 27 дБ во всем диапазоне частот от 3400 до 4200 МГц, обладает значительно меньшими габаритами, весом и энергопотреблением.

На примере конструкции волноводного УРП (рис.1) рассмотрим процесс восстановления ортогонально поляризованных сигналов.

Поляризованные сигналы поступают на вход волноводного поляризационного селектора ПС<sub>1</sub>, где происходит их разложение на ортогональные компоненты, которые затем усиливают по мощности при помощи маломощных усилителей МШУ<sub>1</sub> и МШУ<sub>2</sub>. Усиленные компоненты сигналов вновь поступают в поляризационный селектор ПС<sub>2</sub>, который выполняет функцию поляризатора, после чего поляризованные сигналы проходят сквозь группу вращаемых волноводных поляризаторов ВП<sub>1</sub> и ВП<sub>2</sub>, которые позволяют изменять фазу ортогональных компонент на необходимый угол так, чтобы в выходном поляризационном селекторе ПС<sub>3</sub> интересующие компоненты складывались

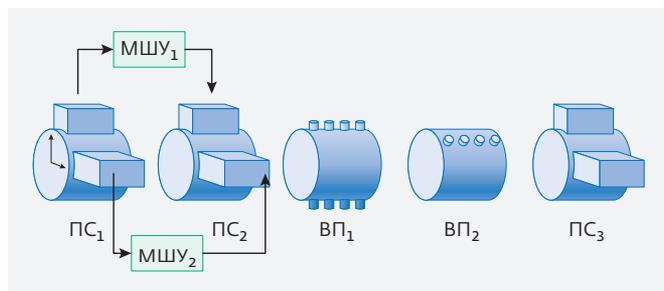


Рис.1. Блок-схема конструкции УРП С-диапазона

синфазно, а мешающие кросс-поляризационные сигналы – противофазно. В зависимости от вида принимаемой поляризации различается алгоритм настройки волноводных поляризаторов.

Для обеспечения высокого уровня развязки по поляризации все детали волноводного тракта должны быть очень качественно изготовлены, так как неточность изготовления влияет на идентичность амплитудно-фазовых характеристик и в конечном итоге приводит к уменьшению максимально достижимой развязки по поляризации. На рис.2 представлен график зависимости максимально реализуемой развязки от разбаланса по амплитуде при сложении ортогональных компонент в выходном поляризационном селекторе.

Как видно из графика на рис.2, для достижения развязки по поляризации на уровне 27 дБ разбаланс по амплитуде не должен превышать 0,8 дБ при отсутствии разбаланса по фазе. Реализовать такие требования в перестраиваемом устройстве, состоящем из нескольких механических и электронных частей, оказывается сложной технологической задачей, что отражается на стоимости изготовления и обслуживания такого устройства разделения поляризации. Более того, наличие большого числа сочленений, электрических приводов и значительные габаритные размеры затрудняют герметизацию такого устройства и требуют обязательного размещения в специальном контейнере, защищающем от воздействия атмосферных явлений.

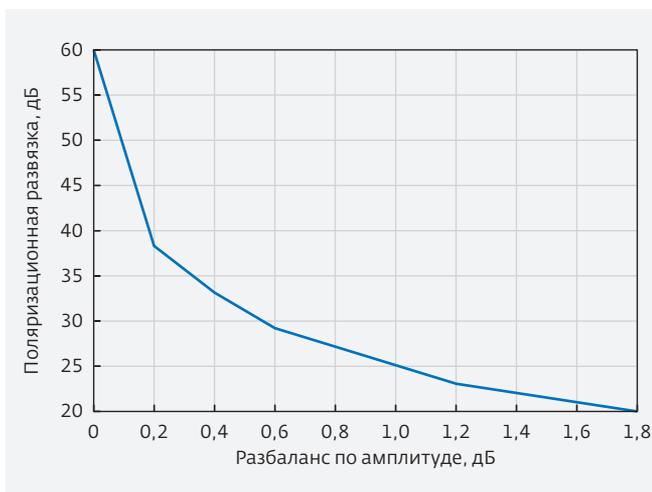


Рис.2. Зависимость максимально реализуемой развязки от разбаланса по амплитуде в плечах выходного селектора

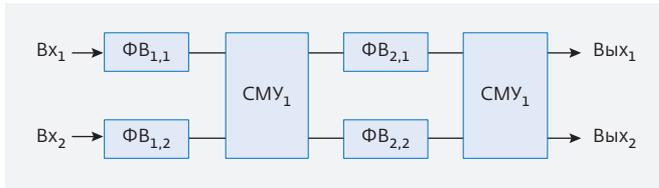


Рис.3. Функциональная схема МУРП

Преодолеть все вышеперечисленные особенности призвано микроэлектронное устройство разделения поляризации (МУРП), которое представляет собой герметичный модуль значительно меньших размеров, в котором отсутствуют подвижные части, что положительно сказывается на надежности устройства и значительно упрощает его плановое техническое обслуживание. Основная задача МУРП – заменить волноводную часть тракта, следующую за парой МШУ<sub>1</sub> и МШУ<sub>2</sub> (см. рис.1), при обеспечении электрических характеристик не хуже, чем у волноводного устройства.

После анализа конструкции волноводного УРП и поиска возможных решений была принята функциональная схема МУРП, представленная на рис.3.

Ортогональные компоненты сигнала, усиленные МШУ, поступают на входы УРП ( $V_{x1}$  и  $V_{x2}$ ), после чего проходят цепи аналоговой обработки, в которых производится относительное изменение фазы сигнала с помощью фазовращателей ( $\Phi_{B1,1}$  –  $\Phi_{B2,2}$ ), а затем осуществляется векторное сложение в суммирующих мостовых устройствах (СМУ).

Согласованное управление фазовращателями  $\Phi_{B2,1}$  и  $\Phi_{B2,2}$  позволяет имитировать эффект, подобный повороту облучателя в фокусе антенны, что особенно актуально при приеме линейно-поляризованных сигналов, а одной из функций входных фазовращателей  $\Phi_{B1,1}$  и  $\Phi_{B1,2}$  является компенсация разбаланса ФЧХ МШУ<sub>1</sub> и МШУ<sub>2</sub>. К достоинствам предложенной функциональной схемы можно также отнести ее масштабируемость, что означает пригодность при использовании в диапазоне частот, отличном от С, и незаменимость при построении устройств разделения поляризации на низких частотах, например, в S- и L-диапазоне.

Применение современной элементной базы для создания МУРП позволяет создать компактное, герметичное и надежное устройство с низким энергопотреблением. В зависимости от задач, решаемых системой, в качестве составных частей могут быть использованы аналоговые или цифровые

Основные технические характеристики МУРП

Наименование параметра	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	3,4 ÷ 4,2
Подавление сигналов кросс-поляризации при приеме линейной/круговой поляризации, дБ	≥27,5/27,5
Потери сигнала, дБ	≤7,5
Коэффициент стоячей волны напряжения по входам / выходам, не более	1,35/1,35
Напряжение питания, В	15 ÷ 24
Ток потребления, мА	≤50
Интерфейс управления	RS-485/CAN
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	150×50×32
Масса, г	350±25

фазовращатели, выпускаемые отечественной и зарубежной электронной промышленностью, а также направленные ответвители различной топологии. Стоит отметить, что ко всем составным частям высокочастотного тракта МУРП предъявляются такие же жесткие требования по разбалансу амплитуд и фаз, как и в волноводном аналоге. Для достижения уровня развязки не хуже 27 дБ во всем диапазоне рабочих частот по всем видам поляризации разбаланс АЧХ и ФЧХ смежных фазовращателей не должен превышать ±0,2 дБ и ±3 град соответственно, а коэффициенты передачи СМУ из смежных плеч не должны отличаться более чем на 0,2 дБ.

Наиболее сложно реализовать требования по разбалансу АЧХ и ФЧХ во всей выбранной полосе частот в фазовращателях, так как эти устройства по своей природе имеют зависимость коэффициента передачи от установленного значения фазы. Для решения этой задачи была разработана конструкция аналогового фазовращателя, обеспечивающего диапазон относительной перестройки фазы от 0 до 100 град при изменении напряжения от 0 до 12 В. Точность установки относительной фазы в рассматриваемом диапазоне частот составила ±3 град, а разбаланс АЧХ не превысил 0,2 дБ.

Изготовленное микроэлектронное устройство разделения поляризации обеспечивает развязку по линейной и круговой поляризации не хуже 27 дБ во всем диапазоне частот от 3,4 до 4,2 ГГц и имеет потери, не превышающие 7,5 дБ. Устройство



**Рис.4.** Внешний вид устройства разделения поляризации С-диапазона

представляет собой герметичный модуль с коаксиальными входами и выходами (рис.4) и управляется от ПЭВМ по интерфейсу RS-485.

В сравнении с волноводным аналогом вес устройства более чем в тридцать раз меньше, а ток потребления не превышает 50 мА. Влияние более высокого значения потерь сигнала в МУРП компенсируется соответствующим выбором коэффициента усиления маломощных усилителей, что не представляется сложным. В таблице представлены основные технические характеристики МУРП.

Применение такого устройства позволяет значительно улучшить массогабаритные характеристики

приемной системы в С-диапазоне, а также значительно удешевить ее. Кроме того, устройство может с успехом решать задачи в мобильных комплексах радиомониторинга, работающих в С-диапазоне.

## ВЫВОДЫ

Проведенная работа показывает принципиальную возможность создания микроэлектронных устройств разделения поляризации, работающих в С-диапазоне и позволяющих полностью заменить волноводные аналоги. Полученный минимальный уровень подавления сигналов кросс-поляризации, равный 27 дБ, является хорошим показателем для современных систем приема сигналов с поляризационным уплотнением. Предложена функциональная схема МУРП, которая может быть с успехом применена для построения устройств разделения поляризации в других, особенно более низкочастотных областях СВЧ-диапазона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. US 6,873,220 B2, Method and apparatus for receiving linear polarization signal and circular polarization signal, mar. 29, 2005.
2. **Naofumi Yoneda.** A design of Novel Grooved Circular waveguide polarizers, IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 48, Feb., 2000.

# СВЕРХМАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

► Р.Г.Давидов, А.И.Кирпиченков  
ЗАО "Микро-ВИС"

В статье рассматривается несколько различных типов малошумящих и сверхмалошумящих усилителей (МШУ) и малошумящих преобразователей частоты (МШПр). Приводятся характеристики изделий с кратким рассмотрением особенностей конструкции.

## SUPER LOW NOISE AMPLIFIERS AND CONVERTERS FOR RADIO ASTRONOMY

R.G.Davidov, A.I.Kirpichenkov

JSC "Micro-VIS"

The article deals with several different types of low noise and ultra-low-noise amplifier (LNA) and low noise blocs (LNB). The characteristics of products with a brief examination of the design features.

**В** современных антенных приемных комплексах (АПК) для радиоастрономических наблюдений определяющую роль в обеспечении необходимой добротности (чувствительности) системы играют характеристики антенны и малошумящего усилителя. Конструкции антенн и МШУ во многом зависят от назначения АПК, диапазона рабочих частот, природных условий, в которых эксплуатируется комплекс. Для достижения наилучшей чувствительности системы конструктивные и технические требования, предъявляемые к МШУ, определяются в основном конструкцией и характеристиками антенны. Необходимо стремиться выполнить условие [1]

$$T_{ш_{МШУ}} \leq T_{ш_{А}}/3,$$

где  $T_{ш_{МШУ}}$  – эквивалентная шумовая температура МШУ,  $T_{ш_{А}}$  – эквивалентная шумовая температура антенны.

В некоторых случаях МШУ конструктивно выполняются в составе МШПр.

Для большинства малошумящих усилителей и преобразователей частоты можно выделить группу общих технических требований:

- диапазон рабочих частот;
  - коэффициент усиления;
  - коэффициент шума;
  - коэффициент стоячей волны по входу и выходу;
  - неравномерность коэффициента передачи в рабочем диапазоне частот;
  - мощность на входе или выходе при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ;
  - подавление интермодуляционных составляющих 3-го порядка;
  - напряжение питания и мощность потребления;
  - тип входного и выходного волноводного фланца или коаксиального радиочастотного соединителя;
  - расположение входа и выхода СВЧ;
  - вариант подачи питания на МШУ (по кабелю СВЧ через выходной радиочастотный соединитель или отдельный электрический соединитель);
  - устойчивость к механическим воздействиям;
  - устойчивость к факторам окружающей среды;
  - габаритные размеры.
- К МШПр предъявляются дополнительные требования:
- подавление сигналов по зеркальному каналу приема;

- долговременная и кратковременная стабильность гетеродина;
- фазовые шумы гетеродина.

ЗАО "Институт микроволновых интегральных систем" (ЗАО "Микро-ВИС") выпускает широкую гамму МШУ и МШПр. Производственная и измерительная база позволяет создавать изделия с рабочей частотой до 43 ГГц. Некоторые из них представлены в данной статье.

### МАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ

Созданы МШУ нескольких типов, условно разделенных по полосе частот и конструктивному исполнению:

- коаксиальные МШУ, работающие в диапазоне частот от 0,01 до 3 ГГц с рабочей полосой от 2 до 50% без применения ферритовых развязывающих устройств на входе;
- коаксиальные МШУ, рассчитанные на диапазон частот от 1 до 40 ГГц с рабочей полосой от 2 до 30%, в которых на входе установлены ферритовые развязывающие вентили;
- волноводные МШУ, работающие в диапазоне частот от 2,2 до 40 ГГц с рабочей полосой от 2 до 30%.

Типовые электрические характеристики МШУ приведены в таблице.

Типовые электрические характеристики МШУ

Диапазон частот, ГГц	Максимально возможная ширина полосы рабочих частот <sup>1</sup> , %	Коэффициент шума <sup>2</sup> , дБ	$K_{CTU}$ входа / выхода	$P_{1дБ}$ по выходу <sup>3</sup> , дБмВт	Максимально допустимая мощность на входе <sup>4</sup> , дБмВт
0,1–0,4	30	0,35	1,25 / 1,25	20	15
0,4–2,3	30	0,3		20	10
2,3–3	20	0,35		15	10
3–4,5	25	0,35		15	5
4,5–8,5	20	0,6		15	5
8,5–13	20	0,8		10	5
13–18	20	1		10	5
18–26	20	1,6		10	5
26–30	10	2,5		10	0
30–40	10	3,5		10	0

Рассмотрим особенности некоторых конструкций.

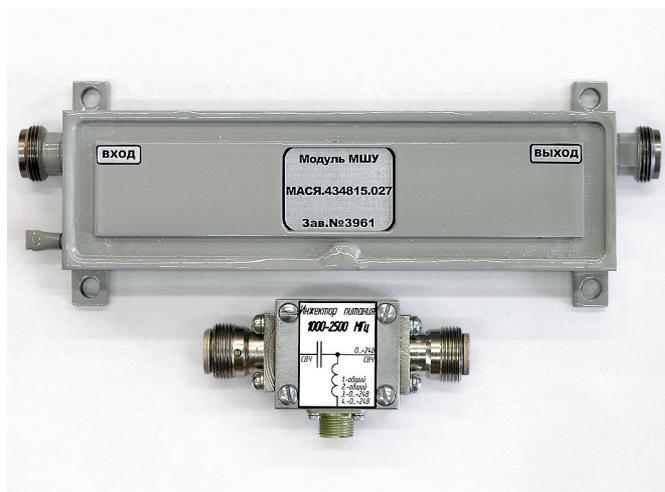
### КОАКСИАЛЬНЫЕ МШУ, РАБОТАЮЩИЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 50 ДО 3000 МГЦ

Усилители этого типа выполняются по одноканальной схеме на широкозатворных рНЕМТ-транзисторах (ширина затвора от 200 до 2000 мкм) и монолитных интегральных схемах (МИС) без применения ферритовых развязывающих устройств.

Таким образом, в МШУ данного типа:

- ширина полосы рабочих частот может быть увеличена при ослаблении требований по  $K_{CTU}$  входа и/или коэффициенту шума;
- коэффициент шума может быть уменьшен при ослаблении требований по  $K_{CTU}$  входа;
- значения мощности приведены для усилителей без специальных защитных устройств на входе;
- мощность может быть увеличена при ослаблении требований по коэффициенту шума.

В первом и втором каскадах МШУ используются рНЕМТ-транзисторы, охваченные отрицательной обратной связью, которая позволяет достичь необходимого уровня  $K_{CTU}$  входа при оптимальной



**Рис.1.** Типовой малошумящий усилитель L-диапазона с подачей питания по кабелю СВЧ через выходной радиочастотный соединитель с инжектором питания

настройке по коэффициенту шума. В рабочем диапазоне частот МШУ определяется тип транзистора для каждого каскада. Токи стоков транзисторов устанавливаются исходя из требований по коэффициенту шума и максимальной входной мощности ( $P_{1дБ}$  по входу). В некоторых случаях при наличии мощной помехи вне диапазона рабочих частот для уменьшения коэффициента усиления за полосой рабочих частот отрицательная обратная связь во втором каскаде выполняется частотнозависимой. При необходимости после второго каскада МШУ устанавливаются полосовые фильтры для подавления внеполосных помех, которые могут перегрузить последующие каскады усиления. Для минимизации коэффициента шума на входе МШУ применяется радиочастотный соединитель с малыми потерями, которые достигаются благодаря использованию высокодобротных диэлектрических материалов и покрытий. МШУ, с подобной структурой, позволяют работать в полосе частот шириной до 30%. Это обусловлено прежде всего уменьшением устойчивости [2] при настройке на широкую полосу по  $K_{стУ}$  входа. В некоторых случаях, несмотря на необходимость обеспечить минимальный коэффициент шума, требуется установка защиты от проникающей на первый каскад МШУ мощности недопустимого уровня. Подобные средства защиты строятся на р-і-п-диодах в совокупности с отрезками высокодобротных линий передачи.

Внешний вид различных МШУ, выпущенных ЗАО "Микро-ВИС", приведен на рис.1 и 2.



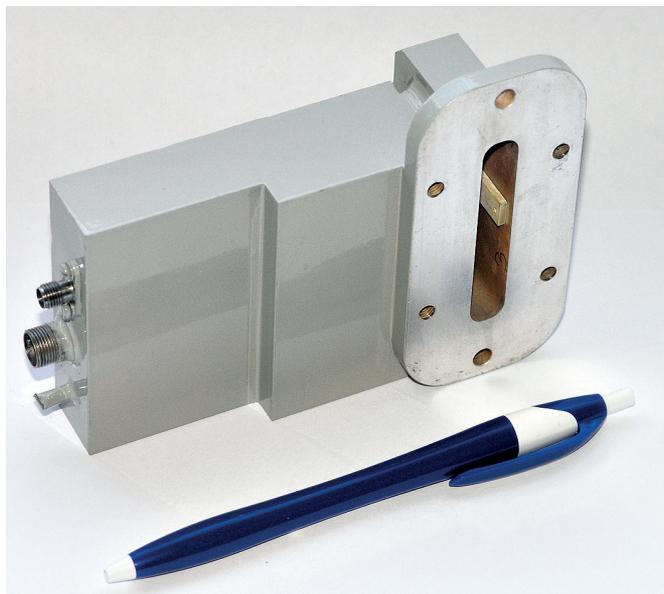
**Рис.2.** МШУ с малым коэффициентом шума L-диапазона, предназначенный для радиоастрономических наблюдений

## КОАКСИАЛЬНЫЕ И ВОЛНОВОДНЫЕ МШУ, РАБОТАЮЩИЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 2 200 ДО 26 000 МГЦ

Усилители этого типа выполняются по однокабельной схеме на НЕМТ-транзисторах и МИС с применением ферритовых развязывающих устройств. На входе МШУ устанавливается ферритовый вентиль, обеспечивающий в необходимом диапазоне частот хорошее согласование с трактом. Это позволяет включать транзисторы первых каскадов в режиме минимального коэффициента шума без существенного влияния на  $K_{стУ}$  на входе. Существуют несколько вариантов установки ферритовых вентилях в МШУ и МШПр:

- волноводный вентиль устанавливается либо как отдельное устройство на входе усилителя, либо внутри корпуса МШУ, обеспечиваются наименьшие потери (0,05...0,15 дБ) и минимальный коэффициент шума МШУ, но при этом увеличиваются масса и габариты;
- микрополосковый вентиль устанавливается только в микрополосковый тракт МШУ, обладает потерями 0,3...0,9 дБ, обеспечивает малые габариты и массу;
- коаксиально-полосковый вентиль обладает малыми потерями (0,15...0,25) и относительно небольшими габаритами, выполнен на симметричной полосковой линии с частичным воздушным заполнением. Устанавливается в тракт МШУ и позволяет производить точную настройку по  $K_{стУ}$  и коэффициенту шума благодаря наличию механических элементов настройки.

Для минимизации потерь на входе МШУ в ряде случаев используется волноводный вход, позволяющий устанавливать МШУ непосредственно



**Рис.3.** МШУ С-диапазона с волноводным входом 58×10 мм

на облучатель. Для исключения из состава тракта дополнительного волноводного перехода был разработан МШУ с узким волноводным входом сечения 58×10 мм (рис.3). Данные усилители выпускаются парами с минимальной разницей как по коэффициенту передачи, так и по фазе, что позволяет устанавливать их до устройства разделения поляризации. Конструкция МШУ приведена на рис.3.

### КОАКСИАЛЬНЫЕ МШУ, РАБОТАЮЩИЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 18 000 ДО 40 000 МГЦ

Усилители этого типа выполняются на бескорпусных монолитных интегральных схемах ("кристаллах") без применения ферритовых развязывающих устройств. МИС устанавливаются непосредственно на корпус усилителя с помощью токопроводящего клея или эвтектического сплава. Микрополосковые платы тракта СВЧ изготавливаются по тонкопленочной технологии на основе поликора толщиной 0,25 мм. Финишные гальванические покрытия корпуса и микрополосковых плат выполняются золотом с толщиной нанесения не менее 5–6 мкм. Весь цикл производства происходит в специальной чистой зоне с контролируемой атмосферой (контроль количества взвешенных частиц по ISO-7, температуры и влажности). Фотография типового модуля МШУ, работающего в диапазоне частот 27000–33000 МГц,

приведена на рис.4. Подобные модули легко каскадируются и требуют однополярного питания +5 В. Коэффициент усиления одного модуля может варьироваться от 15 до 32 дБ с минимальным коэффициентом шума 3 дБ.

### МАЛОШУМЯЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С-ДИАПАЗОНА С ВОЛНОВОДНЫМ ВХОДОМ

Особенностью данной конструкции является интеграция МШУ и преобразователя частоты. МШУ выполнен с применением коаксиально-полоскового вентиль на входе и имеет эквивалентную шумовую температуру входа не более 25°K [1]. Для переноса частоты используется высокостабильный гетеродин (долговременный относительный уход частоты при всех дестабилизирующих факторах, не более  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ ) с низким уровнем спектральной плотности фазовых шумов (при отстройке от несущей на 1 кГц – -101 дБ, на 10 кГц – -110 дБ, на 100 кГц – -114 дБ). В тракт ПЧ встроен цифровой аттенюатор с ослаблением до 31 дБ с шагом 1 дБ для установки оптимального коэффициента усиления. Также МШПр оснащен системой контроля работоспособности. Выбор режима работы МШПр можно осуществлять дистанционно с помощью встроенного микроконтроллера. Фотография МШПр С-диапазона приведена на рис.5.



**Рис.4.** Модуль МШУ Ка-диапазона

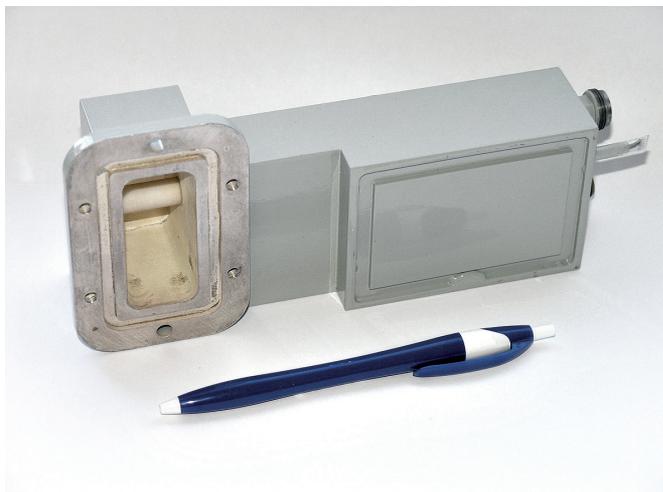


Рис.5. МШПр С-диапазона с волноводным входом

### МАЛОШУМЯЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ КИ-ДИАПАЗОНА С ВОЛНОВОДНЫМ ВХОДОМ

МШПр выполнен в виде герметичного блока с волноводным входом и двумя коаксиальными выходами промежуточной частоты (ПЧ). На входе МШУ используется микрополосковый вентиль, обеспечивающий хорошее согласование с волноводным трактом. Коэффициент шума МШПр не превышает 1 дБ. Диапазон рабочих частот приемного блока, устанавливаемого после МШПр, ограничен полосой частот 950...2050 МГц. Для обеспечения приема во всей полосе входных частот Ки-диапазона после входного МШУ установлен селективный делитель мощности, формирующий сигналы для двух независимых каналов преобразования [2]. Перенос частоты осуществляется с помощью двух

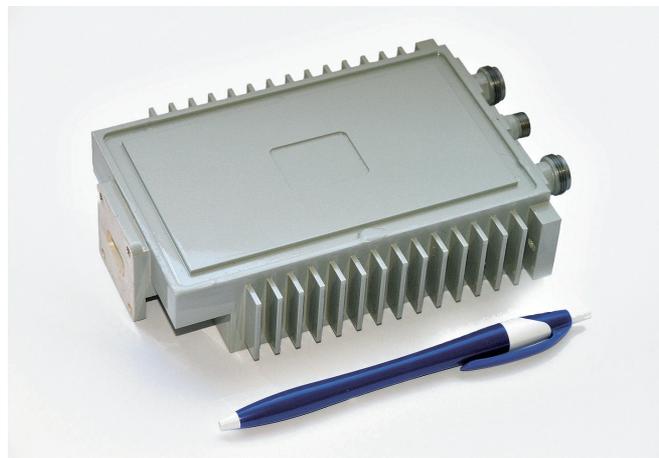


Рис.6. МШПр Ки-диапазона с высокостабильными гетеродинами

высокостабильных гетеродинов (долговременный относительный уход частоты при всех дестабилизирующих факторах, не более  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ ) с низким уровнем спектральной плотности фазовых шумов (при отстройке от несущей на 1 кГц – -101 дБ, на 10 кГц – -104 дБ, на 100 кГц – -109 дБ). В МШПр Ки-диапазона интегрирована система контроля работоспособности и аттенюаторы, аналогичные встроенным в МШПр С-диапазона. Фотография МШПр Ки-диапазона приведена на рис.6.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко В.М. Халяпин Д.Б., Магнушевский В.Р. Малошумящие входные цепи СВЧ приемных устройств. – М.: Связь, 1971.
2. Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. – М.: Сов. радио, 1980.



# ТРАНЗИСТОРЫ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ С ЗАДАНЫМ ПОРОГОВЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

► В.И.Гармаш, В.И.Егоркин, А.А.Зайцев, С.С.Шмелев  
НИУ "МИЭТ"

В работе рассматривается технология изготовления транзисторов с затвором Шоттки на основе гетероструктур AlGaN/GaN с заданным пороговым напряжением. Разработан технологический процесс подгонки порогового напряжения с помощью обработки слоя AlGaN в подзатворной области во фторсодержащей плазме. Сформированы нормально открытые и нормально закрытые транзисторы Шоттки с заданными пороговыми напряжениями.

## GALLIUM NITRIDE BASED SCHOTTKY TRANSISTORS THRESHOLD VOLTAGE ADJUSTMENT

V.I.Garmash, V.I.Egorkin, A.A.Zaytsev, S.S.Shemelev  
NRU MIET

We have proposed and fabricated AlGaN/GaN based Schottky transistor, employing the recessed gate edge structure. The threshold voltage is selected by adjusting fluorine plasma treatment AlGaN gate layer. Fabricated normally-on and normally-off gallium nitride based Schottky transistors.

**В** настоящее время для решения задач в области силовой и СВЧ-электроники активно развивается технология полевых транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN. Особенно высокий научный и практический интерес представляют транзисторы с регулируемым значением порогового напряжения и тока насыщения, вплоть до нормально закрытого транзистора. Такие транзисторы находят широкое применение в различного рода цифровых схемах на основе нитрида галлия, но наиболее перспективные применения лежат в области высоковольтной электроники. Гетероструктуры для транзисторов на основе нитридных соединений выращиваются методами химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (MOCVD), а также молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE) на подложках сапфира ( $Al_2O_3$ ) и карбида кремния (SiC) [1]. GaN-транзисторы обладают рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с устройствами на основе других полупроводников: высокая теплопроводность подложки позволяет

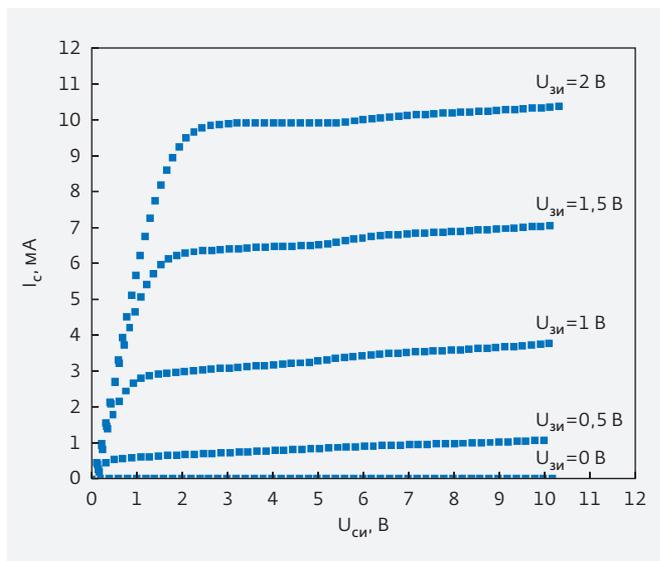
транзисторам работать в условиях большой плотности тока, большая ширина запрещенной зоны GaN приводит к повышению пробивных напряжений, что в совокупности с большими токами насыщения позволяет увеличить мощность транзисторов [2, 3]. Совокупность данных факторов дает возможность использовать их в устройствах, работающих в условиях высоких температур, больших мощностей, а также повышенной радиационной активности.

В нитрид-галлиевых гетероструктурах двумерный электронный газ формируется в слое GaN за счет поляризации вышележащего слоя AlGaN. Подвижность электронов в двумерном электронном газе составляет  $1000-1500 \text{ см}^2/\text{В}^*\text{с}$ , а слоевая концентрация  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . При этом двумерный электронный газ находится на глубине порядка 15-25 нм от поверхности, что в значительной степени ограничивает возможности регулирования тока насыщения и пороговых значений напряжения переключения стандартными путями травления материала полупроводника в области канала.

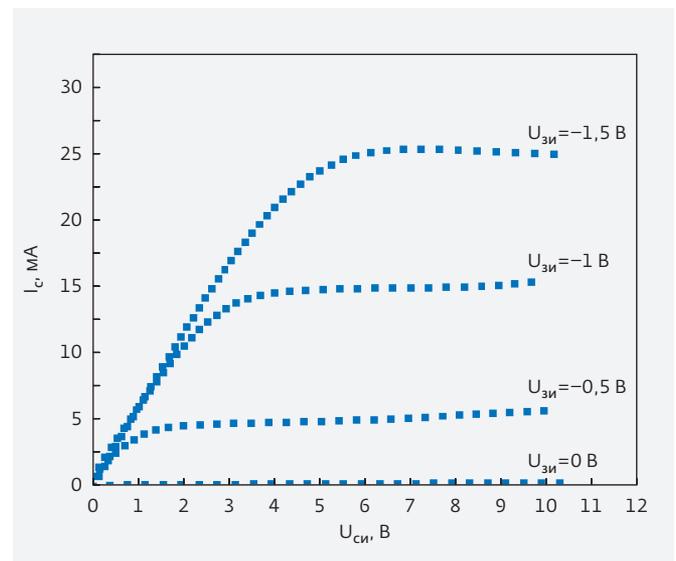
Существует несколько способов снижения концентрации носителей в канале (и соответственно уменьшения порогового напряжения  $V_t$ ). Одним из подходов служит использование углубленного затвора (recessed gate) [4]. Этот метод заключается в обработке в плазме слоя AlGaN в подзатворной области транзистора, что приводит к легированию подзатворной области заряженными ионами фтора и, следовательно, внесению отрицательных зарядов в приповерхностную область [5].

Травление во фторсодержащей среде может проводиться в различных газовых смесях. Как источник активного фтора обычно используются такие газы, как  $SF_6$ ,  $CF_4$ ,  $CHF_3$  с добавками  $O_2$ , Ar, He,  $N_2$ . В некоторых случаях могут применяться другие газы –  $C_4F_8$ ,  $NF_3$ ,  $C_5HF_7$  и пр., а в качестве добавки –  $H_2$  и  $CH_4$ . Фторсодержащие газы широко и успешно используются для травления Si,  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ , однако почти не используются для травления металлов и соединений АЗВ5. Причина в том, что у почти всех фторидов очень низкое давление насыщенных паров, а температура кипения/сублимации очень высока. Это приводит к переосаждению продуктов реакции. Для сравнения температура кипения  $GaF_3$  при атмосферном давлении приблизительно  $1000^\circ C$  (сублимация происходит при  $950^\circ C$ ), а для  $GaCl_3$  и  $Ga_2Cl_6$  составляет  $201,3^\circ C$ . Поэтому для травления нитрида галлия традиционно используются хлорсодержащие газы ( $Cl_2$ ,  $CCl_4$ ,  $SiCl_4$ ,  $BCl_3$ ) [6].

Воздействие  $CHF_3/O_2$  ICP плазмы на поверхность нитрида галлия зависит от нескольких факторов. Во-первых, существует слабый травящий эффект. Как было сказано выше, фториды и, в частности,  $CHF_3$  плохо реагируют с GaN, однако несколько лучше взаимодействуют с оксидом  $Ga_2O_3$ , который образуется из-за наличия  $O_2$  в плазме. Поэтому скорость травления зависит от соотношения потоков  $CHF_3$  и  $O_2$ . Во-вторых, происходит пассивация поверхности продуктами реакции плазмы  $CHF_3/O_2$  и GaN [7]. В-третьих, обработка во фторсодержащей плазме приводит к появлению мелко имплантированной примеси ионов фтора в эпитаксиальном слое. Исследования гетероструктуры AlGaN/GaN методом масс-спектропии вторичных ионов показывают, что при обработке в RIE  $CF_4$  плазме (при смещении от  $-350$  до  $-500$  В, в течение минуты) происходит легирование поверхностного слоя атомами фтора и углерода [8]. Внесение отрицательных зарядов в приповерхностную область AlGaN позволяет изменять концентрацию двумерного электронного газа и, следовательно, величину порогового напряжения. Однако подобный процесс вызывает радиационные нарушения структуры GaN, имплантация ионов в кристаллическую решетку структуры приводит к образованию вакансий и внедрения атомов в междоузлия. Для восстановления характеристик транзисторов применяют термический отжиг, что позволяет снизить количество дефектов



**Рис.1.** Вольт-амперные характеристики нормально закрытого тестового транзистора с длиной затвора  $L=1$  мкм и шириной  $W=50$  мкм.  $I_c$  – ток стока,  $U_{си}$  – напряжение сток-исток



**Рис.2.** Вольт-амперные характеристики нормально открытого тестового транзистора с длиной затвора  $L=1$  мкм и шириной  $W=50$  мкм.  $I_c$  – ток стока,  $U_{си}$  – напряжение сток-исток

и восстановить подвижность. Однако необходимо учитывать, что длительный отжиг приводит к диффузии атомов фтора в область канала, вследствие чего возникает рассеивание электронов на атомах фтора в области каналов [8].

Для дальнейшего улучшения характеристик транзисторов, что требует снижения количества дефектов и повышения стабильности получения заданного порогового напряжения, необходимо проведение исследований процессов подгонки каналов транзисторов. В частности, для снижения дефектов возможно использование более мягкого ICP травления [9].

При изготовлении схемы в качестве изоляции мы использовали мезаструктуры – GaN травился в смеси  $\text{CCl}_4/\text{O}_2$  при RF мощности 180 Вт на глубину 0,1 мкм. Омические контакты Ti/Al/Ni/Au (200 Å/1500 Å/500 Å/1500 Å) методом термического испарения затем вжигались на установке RTP-1200-100 методом быстрого термического отжига (БТО) ( $T=870^\circ\text{C}$ ,  $t=30$  с). Так называемая "ножка" T-образного затвора формировалась в плазмохимическом нитриде кремния толщиной 0,1 мкм методом плазмохимического травления через фоторезистивную маску. Подгонка порогового напряжения проводилась на установке ICP травления Corial 200iL в газовой смеси  $\text{CHF}_3=100$  sccm/ $\text{O}_2=5$  sccm при давлении  $P=10$  mTorr и мощностях  $P_{\text{RF}}=75$  Watt,  $P_{\text{LF}}=120$  Watt за время, равное 50 с для нормально открытого транзистора и 60 с – для нормально закрытого. Металл затвора (Vn/Au) напылялся термическим способом, рисунок затвора формировался взрывом. После напыления затвора проводился отжиг при температуре  $400^\circ\text{C}$  в атмосфере азота в течение 15 мин.

При помощи подгонки пороговых напряжений нами были сформированы нормально открытые и нормально закрытые транзисторы, ниже приведены их вольт-амперные характеристики (см. рис.1 и 2).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Mishra et al.** GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers. Proceedings of the IEEE. Vol. 96, No. 2, February 2008.
2. **Pengelly R.S., Wood S.M., Milligan J.W., Sheppard S.T., Pribble W.L.** A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 60, No. 6, June 2012.
3. **Kao M.-Y., Lee C., Hajji R., Saunier P.I., Tserng H.-Q.** AlGaIn/GaN HEMTs with PAE of 53% at 35 GHz for HPA and Multi-Function MMIC Applications. Microwave Symposium, 2007 // IEEE/MTT-S International.
4. **Kim M., Choi Y.-H., Lim J., Kim Y.-S. OgyunSeok and Han M.-K.** High Breakdown Voltage AlGaIn/GaN HEMTs Employing Recessed Gate Edge Structure. CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010, Portland, Oregon, USA.
5. **Chu R., Soo Suh C., Wong M.H., Fichtenbaum N., Brown D., McCarthy L., Keller S., Wu F., Speck J.S., Mishra U.K.** Impact of CF<sub>4</sub>Plasma Treatment on GaN // IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, Vol. 28, No. 9, September 2007.
6. **Franz G.** Low Pressure Plasmas and Microstructuring Technology. Springer Science & Business Media, 2009. P. 539.
7. **Chen Z.Z., Qin Z.X., Tong Y.Z., Ding X.M., Hu X.D., Yu T.J., Yang Z.J., Zhang G.Y.** Etching damage and its recovery in n-GaN by reactive ion etching. Physica B 334 (2003) 188-192.
8. **Basu A., Kumar V., Adesida I.** Study of fluorine bombardment on the electrical properties of AlGaIn/GaN Heterostructures. J. Vac. Sci. Technol. B 25 (6), Nov/Dec 2007.
9. **Greco et al.** Near-surface processing on AlGaIn/GaN heterostructures: a nanoscale electrical and structural characterization. Nanoscale Research Letters 2011, 6:132.

# РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА

► А.А.Кондукторов, А.И.Кирпиченков  
АО "Микро-ВИС"

Предложен схемотехнический и конструкторско-технологический вариант малошумящего усилителя (МШУ) X-диапазона с использованием переключателя на входе для работы в режимах большого и малого сигналов. Разработан и исследован опытный образец широкополосного малошумящего транзисторного усилителя X-диапазона, основанного на данном принципе.

## THE EXTENSION OF X-BAND LOW NOISE AMPLIFIER DYNAMIC RANGE

A.A.Konduktorov, A.I.Kirpichenkov  
JSC "Micro-WIS"

The circuitry and design-technology variants of X-band low-noise amplifier with switch use on input for operation in modes of high and small signals is offered. The prototype of the X-band low-noise wideband transistor amplifier based on this principle is developed and probed.

Создание широкополосных усилительных устройств с низким коэффициентом шума, а также широким динамическим диапазоном традиционно является одной из основных задач радиоэлектроники СВЧ.

Как известно, расширение динамического диапазона усилителя за счет применения мощных монолитных интегральных схем (МИС) усилителей и дискретных транзисторов, использования балансных схем, а также схем с защитными устройствами на входе неминуемо приводит к ухудшению коэффициента шума.

Балансные схемы построения, как правило, имеют высокие токи потребления и значительные габариты. Все это ограничивает возможность расширения динамического диапазона системы в пределах 3–6 дБ [1].

В настоящее время существует большое число МИС усилителей и дискретных транзисторов X-диапазона, каждые из которых имеют определенные преимущества и недостатки. Для выбора оптимальной конструкции сравнивались технические характеристики различных типов СВЧ-усилителей. В табл.1 представлены основные параметры: коэффициенты усиления ( $K_v$ ), шума ( $K_{ш}$ ), мощность на выходе при

компрессии коэффициента передачи на 1 дБ ( $P_{1дБ}$ ), а также ток потребления ( $I_{потр}$ ).

МИС усилителей, как правило, имеют относительно хорошее согласование по входу-выходу в пределах заявленного диапазона рабочих частот, при этом коэффициент шума таких устройств значительно больше, чем у дискретных малошумящих

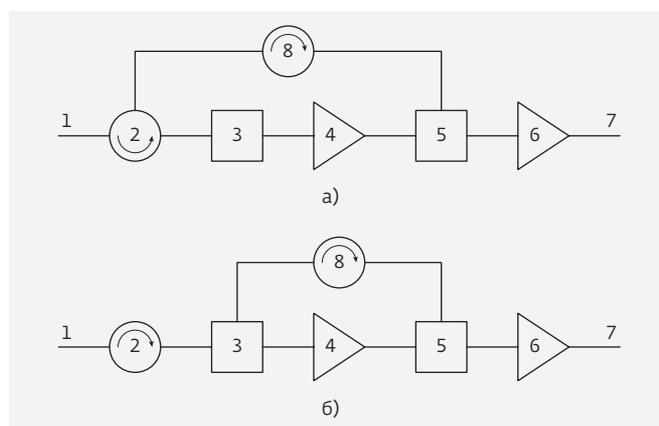


Рис.1. Структурная схема малошумящего усилителя: а – с использованием выключателя на входе; б – с использованием переключателя на входе.

**Таблица 1.** Характеристики транзисторов и МИС усилителей X-диапазона [2, 3, 4, 5]

Наименование	$K_y$ , дБ	$K_{ш}$ , дБ	$P_{1дБ}$ , дБмВт	$I_{потр}$ , мА	Производитель
Транзистор MGF4953A	13,5	0,35	5–7	10	Mitsubishi Electric
Транзистор FPD6836P70	11	1,25	20–22	55	RFMD
МИС TGA2511	20	1,3	12	160	Triquint
МИС HMC-ALH444	16	1,7	19	55	Hittite
МИС HMC753LP4E	14	2	15	55	Hittite

транзисторов. Таким образом, для создания усилителя, работающего в режимах малого сигнала, а также систем, где коэффициент шума входных цепей играет важную роль, предпочтительно использование маломощных транзисторов на входе. Однако к их недостаткам можно отнести необходимость согласования и достаточно низкий динамический диапазон, определяющий линейность устройства при наличии помех большой мощности. Исходя из данных табл.1, наиболее предпочтительным вариантом для достижения минимальных значений коэффициента шума является транзистор MGF4953A производства Mitsubishi Electric.

Для возможности применения данного транзистора в системе, требующей большего динамического диапазона, были рассмотрены схемы, позволяющие увеличить динамический диапазон посредством использования дублирующего (или обводного) канала передачи, служащего для перенаправления мощного сигнала, поступающего на вход маломощного транзистора, в цепи с большей линейностью.

На рис.1а приведена структурная схема усилителя X-диапазона, построенного по принципу переключения. Устройство имеет два режима работы: маломощный и режим большого сигнала. В маломощном режиме сигнал, поступающий на вход 1, усиливается первым каскадом усиления 4, после чего

проходит через переключатель 5 на второй усилительный каскад 6. В режиме большого сигнала сигнал, поступающий на вход 1, отражается от выключателя 3, попадая в обводной канал через циркулятор 2, после чего проходит через переключатель 5 на второй усилительный каскад 6. Вентиль 8 включен в схему в качестве согласованной нагрузки в плече циркулятора, в режиме большого сигнала вентиль также является согласующим элементом во входной цепи транзистора 5. Для контроля уровня поступающей на вход мощности на выходе 7 возможна установка детектора мощности.

На рис.1б представлена альтернативная структурная схема маломощного усилителя. Основное отличие данной схемы заключается в том, что переключение сигнала на входе осуществляется с помощью МИС переключателя 3.

При разработке конечного устройства основное внимание было уделено узлу переключения сигнала на входе, во многом определяющего коэффициент шума усилителя за счет пересчета потерь во входной цепи. Для выбора оптимальной схемы сравнивались характеристики нескольких типов коммутационных МИС X-диапазона по величине вносимых потерь L (табл.2).

Анализ полученных данных показывает, что наименьшими вносимыми потерями из рассмотренных коммутационных МИС обладают СВЧ-выключатели.

**Таблица 2.** Характеристики МИС переключателей и выключателей X-диапазона [4, 5, 6]

Наименование	L, дБ	Тип	Производитель
HMC975	0,6	Переключатель отражающего типа 1 на 2	Hittite
TGS2302	0,7	Переключатель отражающего типа 1 на 2	Triquint
MA4AGSW2	0,5	Переключатель отражающего типа 1 на 2	Macom
MA4AGSW1	0,15	Выключатель отражающего типа	Macom
MA4SW110	0,45	Выключатель отражающего типа	Macom

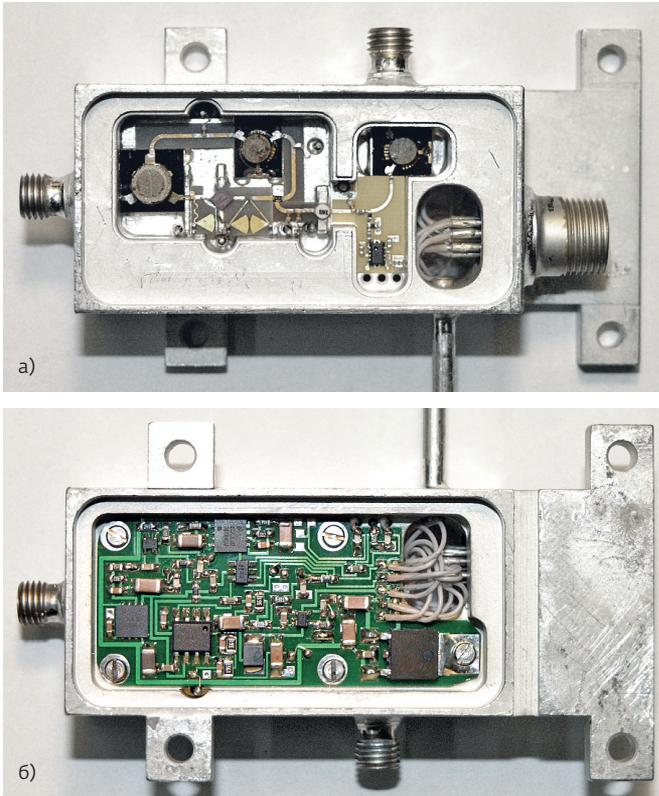


Рис.2. Внешний вид высокочастотной части модуля (а), платы питания и управления (б)

Таким образом, наиболее приемлемым вариантом реализации узла коммутации входной цепи усилителя является первый из описанных выше (рис.1а), поскольку имеет наименьшее значение

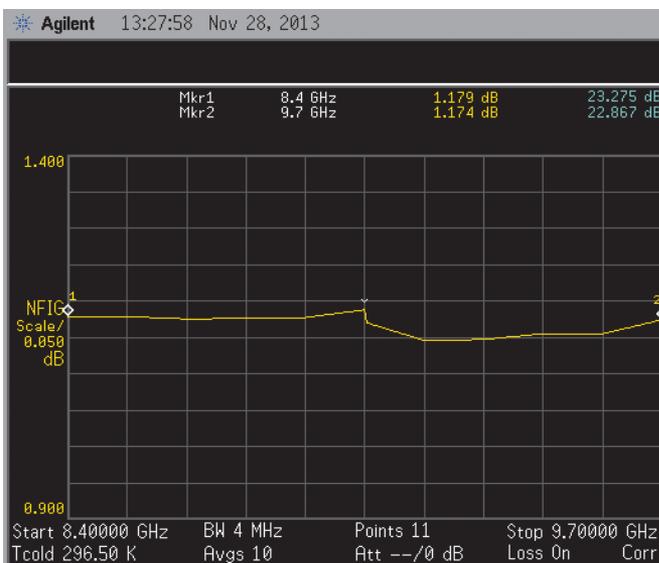


Рис.3. Коэффициент шума усилителя в маломощном режиме

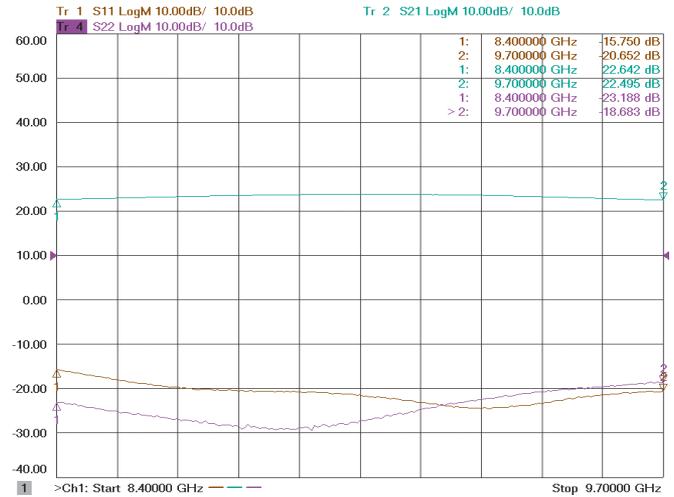


Рис.4. S-параметры усилителя в маломощном режиме

коэффициента шума, благодаря возможности применения ключей с малыми потерями.

На основе рассмотренной схемы был создан опытный образец усилителя, представляющий собой герметичный микроблок. Габаритные размеры устройства 72×44×24 мм. Разработка топологий плат и конструкции корпуса производились параллельно с целью минимизации паразитного влияния пространства корпуса на параметры устройства, а также снижения неравномерности и нерегулярности линий передач СВЧ-тракта. Вход и выход сигналов коаксиальный (соединители радиочастотные типа СРГ50-751ФВ "розетка"). С целью минимизации габаритных размеров модуля платы размещены

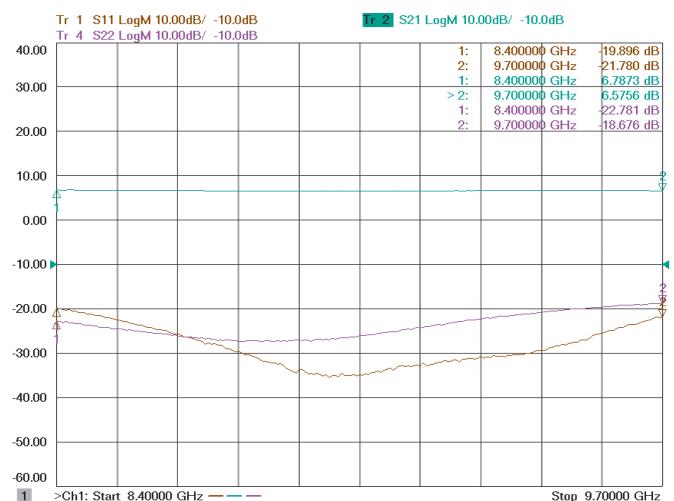
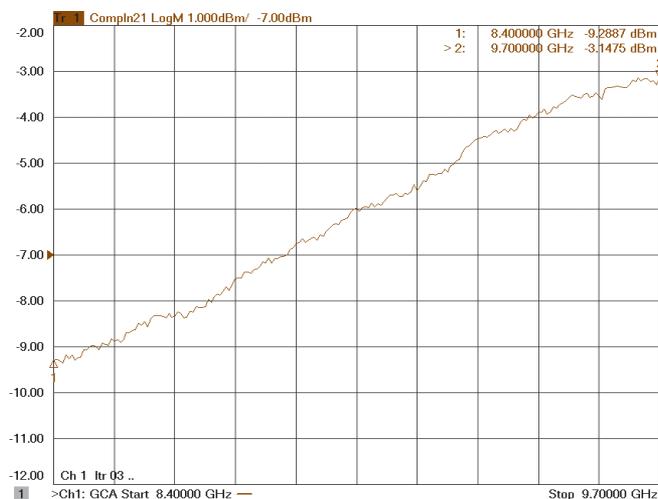


Рис.5. S-параметры усилителя в режиме большого сигнала



**Рис.6.** Мощность на входе при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ в маломощном режиме

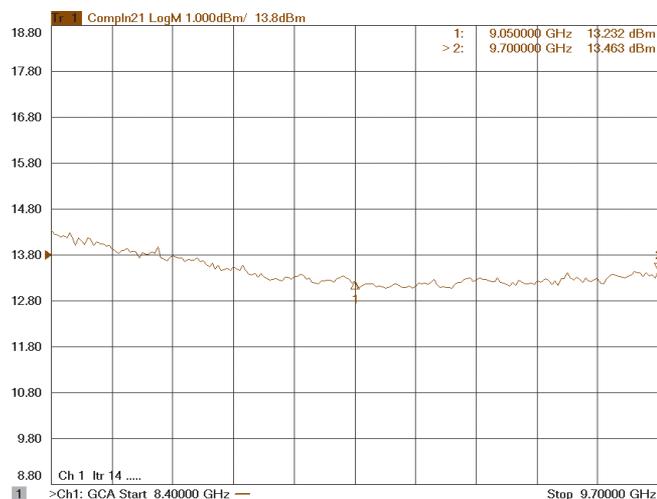
с двух сторон (рис.2). Ток потребления модуля составил 150 мА.

В качестве ключа на входе первого каскада усиления применялась бескорпусная МИС MA4AGSW1 производства фирмы Masom, обладающая наименьшими потерями в рабочем диапазоне частот. Согласование входного транзистора MGF4953A по минимальному коэффициенту шума осуществлялось с помощью реактивных цепей на входе.

Результаты измерения коэффициента шума на приборе N8975A представлены на рис.3. Значение коэффициента шума не превышало 1,2 дБ во всем диапазоне рабочих частот.

Второй каскад усиления выполнен на основе транзистора FPD6836P70 производства RFMD, обладающего высокой линейностью. На выходе второго каскада установлен логарифмический детектор, позволяющий осуществлять контроль мощности, поступающей на вход усилителя. Для переключения режимов работы усилителя посредством управления переключателями применялся быстродействующий драйвер MADR-007097-000100-1 производства Masom.

Измерения S-параметров, а также линейности устройства осуществлялись на панорамном измерителе PNA-X N5242A. Результаты измерения (рис.4, 5) показали, что использование циркулятора на входе устройства, служащего для перенаправления СВЧ-тракта в режиме большого сигнала, обеспечило низкие обратные потери на входе на уровне 15–20 дБ во всех режимах работы устройства. Измеренная максимальная мощность на входе усилителя при компрессии коэффициента передачи



**Рис.7.** Мощность на входе при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ в режиме большого сигнала

на 1 дБ в маломощном режиме находилась в пределах от –9 до –3 дБмВт во всем диапазоне рабочих частот (рис.6), в то время как мощность, измеренная в режиме большого сигнала, составила 13–14 дБмВт (рис.7).

Таким образом, описанная выше схема маломощного усилителя позволила расширить динамический диапазон устройства на 16 дБ в режиме работы при большом сигнале на входе при сохранении относительно небольшого коэффициента шума в маломощном режиме. Данная схема может быть использована при построении маломощных усилителей различных диапазонов частот при наличии соответствующей элементной базы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Петров Г. Толстой А.И.** Линейные балансные СВЧ усилители. – М.: Радио и связь, 1983.
2. Информационный ресурс фирмы Mitsubishi Electric Corporation, 2015.  
URL: <http://www.mitsubishielectric.com>.
3. Информационный ресурс фирмы RF Micro Devices, Inc. (RFMD), 2015.  
URL: <http://www.rfmd.com>.
4. Информационный ресурс фирмы TriQuint Semiconductor, 2015.  
URL: <http://www.triquint.com>.
5. Информационный ресурс фирмы Hittite Microwave, 2015. URL: <http://www.hittite.com>.
6. Информационный ресурс фирмы M/A-COM Technology Solutions Holdings, Inc., 2015.  
URL: <http://www.macom.com>.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА В СОВРЕМЕННОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

► А.Д.Просий, С.О.Ранчин, Н.А.Шелепин  
ОАО "НИИМЭ и Микрон"

В ОАО "НИИМЭ и Микрон" построена новая современная фабрика и освоены технологии для производства микросхем с технологическим уровнем 180–90. Технологии позволяют вести серийное изготовление микросхем с количеством более 100 млн. компонентов для коммерческой и промышленной аппаратуры и до 40–60 млн. компонентов для космической аппаратуры. Достигнутый уровень технологии гарантируется соблюдением высоких требований к технологическим процессам обработки пластин, необходимым уровнем и мощностью технологического и аналитического оборудования, а также непрерывным автоматизированным контролем всех элементов системы качества.

## QUALITY ASSURANCE IN MODERN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING

A.Prosyi, S.Ranchin, N.Shelepin  
JSC Micron

JSC Mikron has built a new modern factory and mastered technology for production of chips with the technological node 180–90 nm. Technology allows the manufacture of chips with more than 100 million components for commercial and industrial equipment and up to 40–60 million components for space equipment. This level of technology can only be assured by observance of high requirements to technological processes of processing of wafers, to ensure the required level and working capacity of technological and analytical equipment and ensure continuous computer control of all elements of the quality system.

## ВВЕДЕНИЕ

В результате последовательной реализации инвестиционных проектов и мероприятий ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" в ОАО "НИИМЭ и Микрон" построена новая современная фабрика и освоены технологии для производства микросхем с технологическим уровнем 180–90, что вывело Россию в ограниченное число стран, способных производить на территории РФ современные СБИС различного назначения и, тем самым, обеспечивать свою информационную безопасность [1]. Освоенные по лицензии компании "STMicroelectronics" и разработанные своими силами технологии позволяют

вести серийное изготовление микросхем с количеством более 100 млн. компонентов для коммерческой и промышленной аппаратуры и до 40–60 млн. компонентов для космической аппаратуры с соответствующим уровнем стойкости к воздействию факторов космического пространства [2]. Вполне естественно, что такой уровень технологий может быть обеспечен только соблюдением высочайших требований к технологическим процессам обработки пластин, обеспечению необходимого уровня и работоспособности технологического и контрольно-аналитического оборудования и обеспечения непрерывного компьютерного контроля за всеми элементами системы качества.

## 1. ОСНОВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ СБИС ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ОКОЛО И СУБМИКРОННОГО УРОВНЯ К СУБ-200 И 100-НАНОМЕТРОВОМУ УРОВНЮ

Возрастают требования к надежности технологических операций [3] и, как следствие:

- количество технологических операций увеличивается со 120 до 650;
- повышаются требования к выходу годных пластин;
- допустимая вероятность ошибки при выполнении операции снижается с 0,1% до 0,01%.

Используется система компьютерного интегрированного производства. При поступлении партии на установку система управления автоматически:

- находит в базе данных и загружает в установку нужный режим обработки;
- запускает процесс обработки;
- заносит результаты обработки в базу данных.

Изменяются функции персонала:

- оператор обеспечивает цикл производства, запускает обработку партии, передает партию на следующую операцию;
- инженер-технолог обеспечивает готовность технологических процессов к обработке партий.

Резко растут требования к обеспечению производства: осуществляется реализация сверхчистого производства. Для обеспечения выхода годных микросхем производство ведется в чистых комнатах, позволяющих уменьшить количество частиц с 40 000 до 30 на кв. м. С уменьшением размера элемента с 0,8 до 0,18 мкм количество опасных частиц возрастает в 30 раз! Размер опасных частиц настолько мал, что оптический визуальный контроль пластин становится неэффективным. Для защиты пластин от загрязнений используется система SMIF (т.е. транспорт пластин осуществляется в герметичных контейнерах с герметичным же обеспечением их загрузки и разгрузки в технологическое оборудование). Используются системы очистки и доставки сверхчистых материалов к оборудованию. Для операционного контроля используются автоматические системы контроля дефектности пластин KLA 2139, KLA AIT XR. Резко возрастают требования к обеспечению производства. Количество контролируемых параметров увеличивается с 200 до 10 000. При отклонении любого из параметров необходимо: остановить процесс, найти и устранить причину отклонения.

## 2. КВАЛИФИКАЦИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

При освоении новых технологий реализуется система их квалификации, которая состоит из нескольких этапов.

1. Разработка эскизной версии технологии:
  - разработка эскизного варианта плана управления процессами по разработанной технологии;
  - определение перечня новых рецептов для использования в этой технологии;
  - разработка эскизных версий рецептов;
  - валидация рецептов на соответствие установленным требованиям;
  - документирование эскизных версий рецептов.
2. Изготовление прототипа новой технологии:
  - изготовление тестового кристалла, демонстрационного изделия; поэтапная отработка технологии;
  - обеспечение требований к разрезу физической структуры;
  - обеспечение требований к электрическим параметрам элементов;
  - обеспечение требований к надежности и проценту выхода годных;
  - внесение изменений в план управления процессами и рецепты; осуществляется с контролем версий.
3. Осуществление серийного производства:
  - внесение изменений в план управления процессами и Рецепты осуществляется с контролем версий на основе утвержденной технологической пробы.
4. Новые технологии проходят испытания с использованием тестовых структур на надежность элементной базы:
  - устойчивость диэлектрических слоев многослойной металлизации к длительному воздействию повышенной температуры;
  - устойчивость металлических дорожек к электромиграции;
  - устойчивость параметров транзисторов к длительному воздействию повышенной температуры;
  - проверка деградации параметров транзисторов под воздействием стрессовых условий, при которых образуются "горячие" носители;
  - исследование пробивных характеристик диэлектрических слоев;
  - устойчивость к специальным видам воздействия в зависимости от назначения технологии.

### 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СБИС В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

#### Общие принципы организации системы качества:

- систематические аудиты технологических процессов и системы менеджмента качества в целом;
- планирование и реализация корректирующих действий по результатам аудитов;
- принятие предупреждающих действий по результатам систематического анализа процессов.

#### Реализация этих принципов:

1. организация контрольного плана (операционный контроль);
2. постоянный дополнительный контроль за состоянием технологического и контрольно-измерительного оборудования с помощью специальных тестовых процессов;
3. метрологическое обеспечение измерений;
4. статистическое управление процессами;
5. входной контроль используемых материалов.

Следует особо отметить, что обеспечение качества в серийном производстве изделий с проектными нормами уровня 90–180 нм включает следующие функции контрольного плана (т.е. операционного контроля):

- обеспечение постоянного контроля параметров физической структуры и дефектности продукции после проведения технологических операций более чем в 200 точках маршрута изготовления ИС;
- применение для этих целей более трех десятков высокоточных автоматизированных измерительных систем ведущих фирм-производителей контрольно-измерительного оборудования (KLA-Tencor, Hitachi HT, Rudolph Technologies, Rigaku, SDI Semilab).

При этом обеспечивается контроль максимально широкого набора физических и технологических параметров:

- контроль линейных размеров по фоторезистивной маске и после травления;
- контроль толщин однослойных и многослойных диэлектрических структур;
- контроль толщин однослойных и многослойных металлических структур;
- контроль совмещения;
- контроль геометрических параметров пластин;
- контроль поверхностного сопротивления;
- контроль диффузионной длины;

- контроль зарядовых свойств диэлектриков и их состава (содержание В, Р, F);
- контроль равномерности распределения дозы ионного легирования по пластине;
- автоматизированный контроль и анализ уровня дефектности продукции, идентификация и исследование дефектов в автоматическом режиме;
- контроль привносимой дефектности для всего технологического и контрольно-измерительного оборудования;
- контроль загрязнения примесями металлов всего технологического и контрольно-измерительного оборудования.
- кроме того, обеспечивается постоянный дополнительный контроль состояния технологического и контрольно-измерительного оборудования с помощью специальных тестовых процессов и постоянно проводятся мероприятия по метрологическому обеспечению измерений:
- использование для калибровки контрольно-измерительного оборудования стандартов международного класса (VLSI Standards, Inc) (более 30 типов);
- использование для проверки контрольно-измерительного оборудования наборов стандартных образцов фирм-изготовителей оборудования национального уровня, общепризнанных в мировой электронной промышленности (более 100 типов);
- организация постоянного контроля состояния контрольно-измерительного оборудования между калибровками на основе методов статистического управления процессами на базе расширенного набора стандартных образцов класса "контрольный образец предприятия" (более 200 типов);
- проведение метрологического сличения ("матчинга") всей системы измерений с системой измерений на ведущем предприятии мировой микроэлектроники ST Microelectronics (Франция).

#### Статистическое управление процессами

- Автоматизированный сбор и хранение измеренных данных со всех контрольных точек маршрута (более 200 точек);
- повсеместное использование статистических методов управления процессами, в том числе в системе управления производством для автоматического построения контрольных карт и принятия решения о контролируемости процесса в реальном масштабе времени;

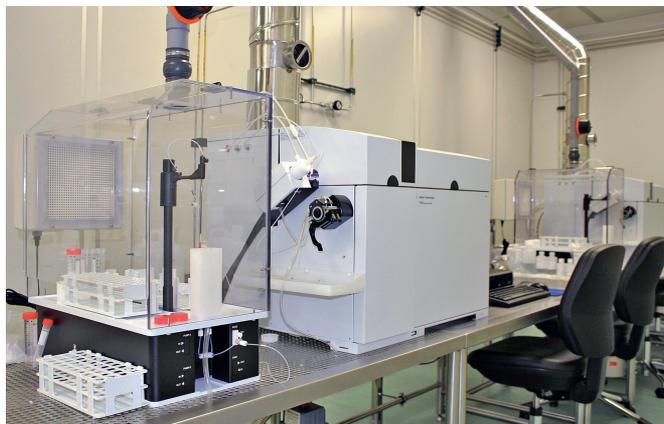


Рис.1. ICP-MS Agilent 7700S

- широкое применение статистических методов для анализа данных о процессах и продукции и их оптимизации с использованием общепринятых в мировой практике систем обработки и анализа данных "Klarity ACE XP" и "Klarity Defect".

### Обеспечение качества используемых материалов и оборудования

- Применение материалов с гарантированным уровнем качества от ведущих мировых производителей;
- применение для производства оборудования ведущих производителей с обеспечением обслуживания сервисными центрами производителя оборудования;
- применение автоматизированных систем подачи химических материалов и газов с обеспечением автоматизированного контроля на всех этапах.

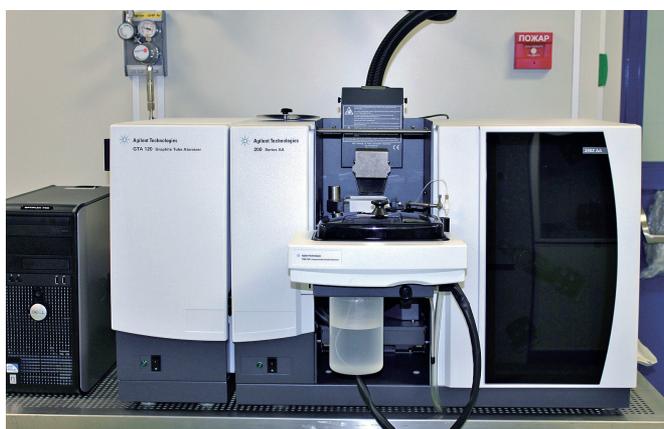


Рис.2. AA240Z Agilent (Varian)



Рис.3. ICS-2100 Dionex

### Организация входного контроля используемых материалов

Лаборатория входного контроля оснащена современным оборудованием мирового уровня.

Установка масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой ICP-MS Agilent 7700S (рис.1) обеспечивает определение подавляющего большинства элементов в сверхчистой деионизованной воде и химреактивах.

Технические характеристики: нижний предел обнаружения примесей 0,01÷1,0 нг/л)

Атомно-абсорбционный спектрометр AA240Z Agilent (Varian) (рис.2).

Технические характеристики:

- малый объем пробы (3-5 мл);
- высокая (на уровне мкг/л) чувствительность;
- высокая производительность;
- возможность проведения анализа в автоматическом режиме без присмотра оператора;
- анализ проб сложного состава.



Рис.4. TD300 Perkin Elmer

### Ионная хроматографическая система ICS-2100 Dionex (рис.3).

Технические характеристики:

- анализ на уровне ppt и ppb;
- первая безреагентная хроматографическая система;
- полная автоматизация пробоподготовки;
- управление, контроль и цифровой сбор данных;
- хроматографическая программа пересчитывает каждый пик на хроматограмме в концентрацию образца и выдает распечатку результатов.

### Хромато-масс-спектрометрическая система GC 7890 A/MS 5975C Agilent с термодесорбером TD300 Perkin Elmer (рис.4)

Технические характеристики:

- высокая производительность и эффективность;
- воспроизводимость результатов на различных газовых хроматографах или системах газовой хроматограф/масс-спектрометр;
- анализ сложных образцов;
- идентификация неизвестных соединений;
- высокая чувствительность.

## ВЫВОДЫ

Кратко описана система обеспечения качества производства современных СБИС суб-100-нанометрового уровня, которая должна быть на фабрике, оснащенной современным технологическим, контрольно-измерительным и аналитическим оборудованием.

Основными компонентами данной системы являются: реализация общих принципов системы менеджмента качества на основе современного контрольно-измерительного и аналитического оборудования, включающего контроль параметров физической структуры и дефектности после проведения технологических операций более

чем в 200 точках маршрута изготовления микросхем в сочетании с постоянным дополнительным контролем состояния как технологического, так и контрольно-измерительного оборудования; статистическое управление процессами; обеспечение качества используемых материалов.

На примере ФАБ-200 ОАО "НИИМЭ и Микрон" показана конкретная реализация данной системы самого современного контроля качества технологических процессов и характеристик элементов ИС и изделий, что в сочетании с имеющимся технологическим оборудованием обеспечивает серийное производство высоконадежных СБИС технологического уровня 180–90 нм и в ближайшей перспективе при некотором дооснащении дополнительным оборудованием позволит обеспечить производство СБИС с технологическим уровнем 65–45 нм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Я., Шелепин Н.А.** Применение средств радиочастотной идентификации в инфраструктуре региона // Материалы VII отраслевой научно-технической конференции "Инновационные технологии радиоэлектронного комплекса – регионам России" 23–15 сентября 2008 г., Санкт-Петербург. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2009. С. 58–60.
2. **Шелепин Н.А.** Особенности суб-100-нанометровых технологий СБИС и их реализация в ОАО "НИИМЭ и Микрон" // Международная конференция "Микроэлектроника-2015", Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение / Сб. тез. г. Алушта, Крым, 28 сентября – 3 октября 2015 г. С. 17–19
3. International Technology Roadmap Status (ITRS), 2013.

# ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЭФФЕКТ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛАЗМОЙ В КАНАЛЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

► О.А.Клименко<sup>1</sup>, Ю.А.Митягин<sup>1</sup>, В.Н.Мурзин<sup>1</sup>, Н.В.Дьяконова<sup>2</sup>, В.Кнап<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ФИ РАН, <sup>2</sup>CCL, France

В работе экспериментально исследовано влияние постоянного тока в канале полевого транзистора на детектирование терагерцевого излучения двумерной электронной плазмой в перпендикулярной плоскости плазмы в магнитном поле. Показано, что наличие тока приводит к размытию осцилляций сигнала детектирования как функции магнитного поля, обусловленных эффектом Шубникова-де Гааза. Обнаружено, что при определенных условиях наличие постоянного тока приводит к дополнительному увеличению сигнала детектирования.

## DIRECT CURRENT INFLUENCE ON TERAHERTZ RADIATION DETECTION BY 2D ELECTRON PLASMA IN THE CHANNEL OF A FIELD EFFECT TRANSISTOR IN MAGNETIC FIELD

O.A.Klimenko<sup>1</sup>, Yu.A.Mityagin<sup>1</sup>, V.N.Mursin<sup>1</sup>, N.V.Dyakonova<sup>2</sup>, V.Knap<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSIS Phi RAS, <sup>2</sup>CCL France

We present experimental results of direct current effect on terahertz radiation detection by 2D electron plasma in the channel of a field effect transistor placed in magnetic field normal to the plasma plane. We show that the direct source-drain current causes oscillations decay of the detection signal as a function of magnetic field. We also found that under certain conditions the DC current leads to an additional increase of the detection signal in magnetic field.

## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря высокому быстродействию и высокому уровню развития технологий производства интегральных микросхем, полевые транзисторы являются перспективными чувствительными элементами для систем получения терагерцевых (ТГц) изображений различных объектов. Механизм детектирования таких элементов связан с возбуждением двумерной электронной плазмы в канале транзистора [1, 2]. В силу нелинейных свойств плазмы под действием падающего ТГц-излучения возникает постоянное

напряжение между стоком и истоком транзистора, называемое фотооткликом. Наличие магнитного поля, как и постоянного тока в канале полевого транзистора позволяет контролируемым образом воздействовать на свойства двумерной плазмы, что может привести как к новым эффектам, так и к увеличению чувствительности транзистора [3–6]. В данной работе выполнены исследования влияния постоянного электрического тока сток-исток на нерезонансный ТГц фотоотклик полевых транзисторных структур, помещенных в квантующее магнитное поле.

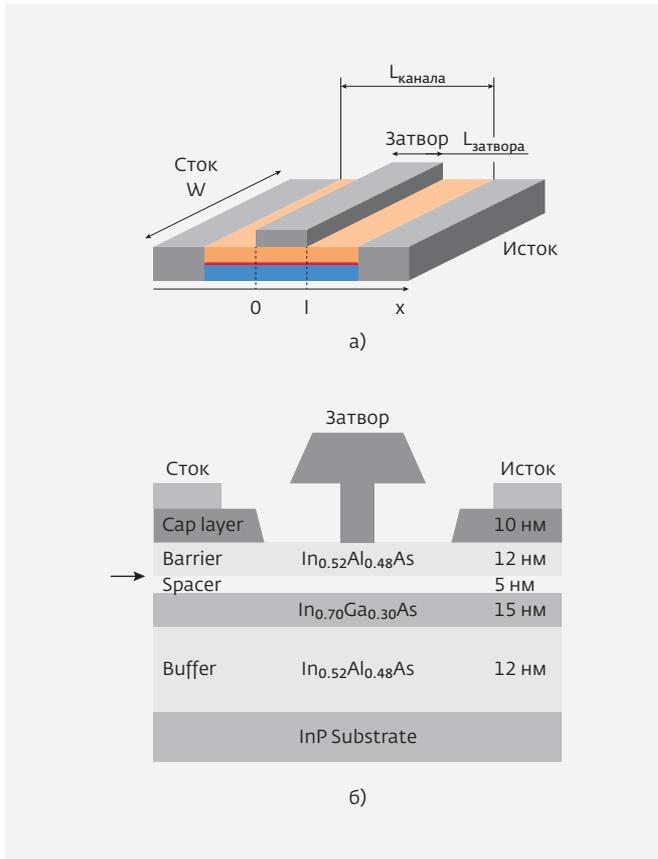


Рис.1. Основные размеры (а) и структура слоев (б) исследуемых InAlAs/InGaAs НЕМТ; стрелкой обозначен слой δ-легирования (подр. описание см. в тексте)

### ОБРАЗЦЫ, ЭКСПЕРИМЕНТ

Изучение фотоотклика полевых транзисторов в магнитном поле проводилось на InAlAs/InGaAs НЕМТ (high electron mobility transistor - транзистор с высокой подвижностью электронов) (рис.1). Гетероструктура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на InP полупроводниковой подложке в IEMN (Лилль, Франция). Структура состоит из буферного слоя  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  толщиной 200 нм, псевдоморфного  $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$  слоя канала толщиной 15 нм,  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  спейсера толщиной 5 нм, слоя δ-легирования Si с концентрацией  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , барьерного слоя  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  толщиной 12 нм и верхнего легированного

Si с концентрацией  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  слоя  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  толщиной 10 нм, изготовленного с целью минимизации неподзатворной области канала. Расстояние между стоком и истоком составляло 2,6 мкм. Затвор длиной 0,8 мкм и шириной 10 мкм наносился ровно посередине между стоком и истоком и образовывал с барьерным слоем контакт Шоттки.

Исследования проводились в парах гелия при температуре образца 7 К. Образец располагался в центре сверхпроводящего магнита, создававшего перпендикулярное слоям поле величиной до 15 Тл. Схема измерений представлена на рис.2. В качестве источника излучения использовалась лампа обратной волны (ЛОВ), настроенная на частоту 0,94 ТГц, для которой величина циклотронного поля составляла  $B_c = 1,63 \text{ Тл}$ . Модуляция излучения осуществлялась на частоте 133 Гц с помощью генератора напряжения, варьирующего напряжение катода ЛОВ. Измерения фотоотклика проводились с помощью синхронного детектора L1, синхронизированного с модулятором напряжения катода ЛОВ. Измерения магнетосопротивления осуществлялись с помощью комбинированного цифрового прибора Keithley 2410, который задавал постоянный ток между стоком и истоком транзистора,  $I_{sd}$ , и регистрировал величину падения напряжения на канале как функцию магнитного поля. Исток транзистора был всегда заземлен, положительным считался ток, когда к стоку прикладывалось положительное напряжение, а отрицательным - когда

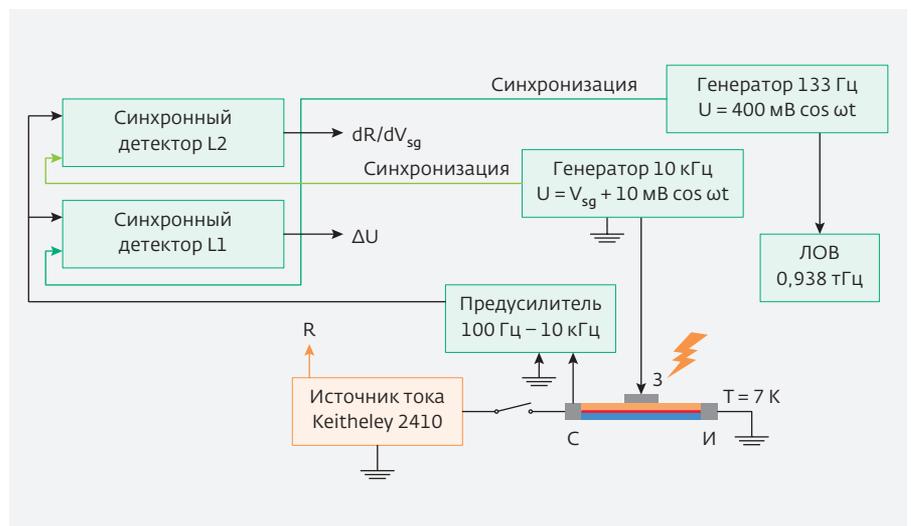
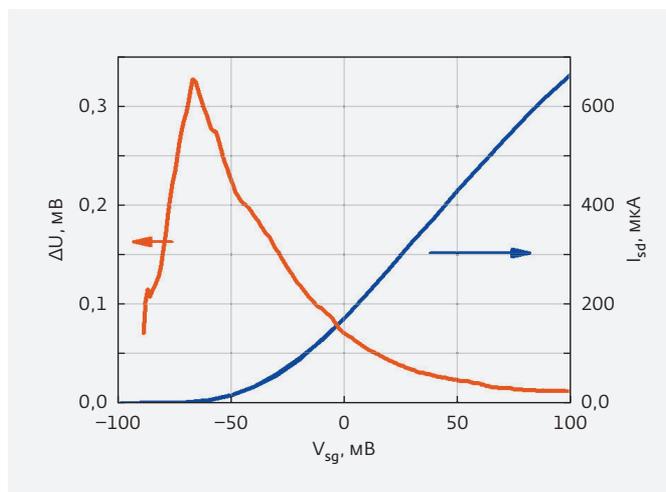


Рис.2. Схема измерений зависимости фотоотклика полевого транзистора  $\Delta U$  от перпендикулярного слоям магнитного поля, магнетосопротивления  $R$  и его производной по напряжению на затворе  $dR/dV_{sg}$  при заданном напряжении на затворе



**Рис.3.** Зависимость фотоотклика от напряжения на затворе (оранжевый) в сравнении с вольт-амперной характеристикой исследуемых InAlAs/InGaAs НЕМТ (синий)

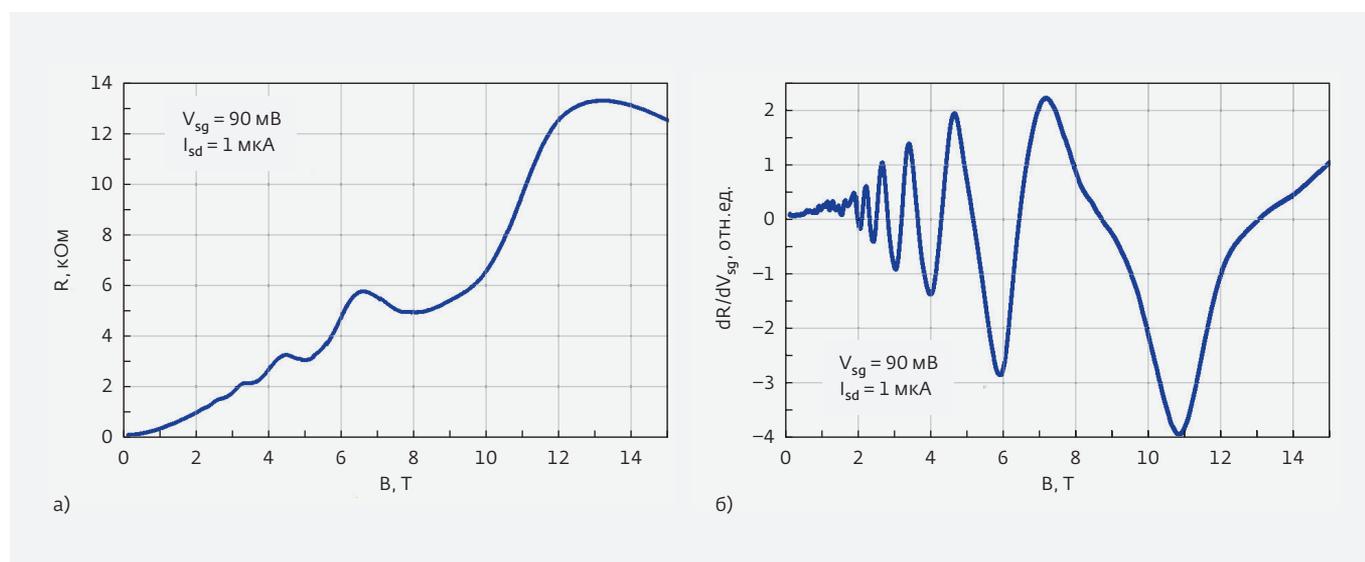
отрицательное. Для измерений производной магнетосопротивления по напряжению на затворе последнее модулировалось с частотой 10 кГц и амплитудой 10 мВ, достаточно малой по сравнению с эффективным напряжением на затворе  $U_{\text{eff}} = V_{\text{sg}} - V_{\text{th}}$ , где  $V_{\text{th}} \approx -70$  мВ – напряжение отсечки исследованного транзистора, а  $V_{\text{sg}}$  – прикладываемое напряжение затвор-исток. Напряжение  $V_{\text{sg}}$  задавалось генератором как величина среднего уровня осцилляций. Синхронизированный

с данным генератором синхронный детектор L2 регистрировал производную магнетосопротивления по напряжению на затворе. Полоса усиления предусилителя (100 Гц – 10 кГц) включала в себя как частоту модуляции ЛОВ, так и частоту модуляции напряжения на затворе.

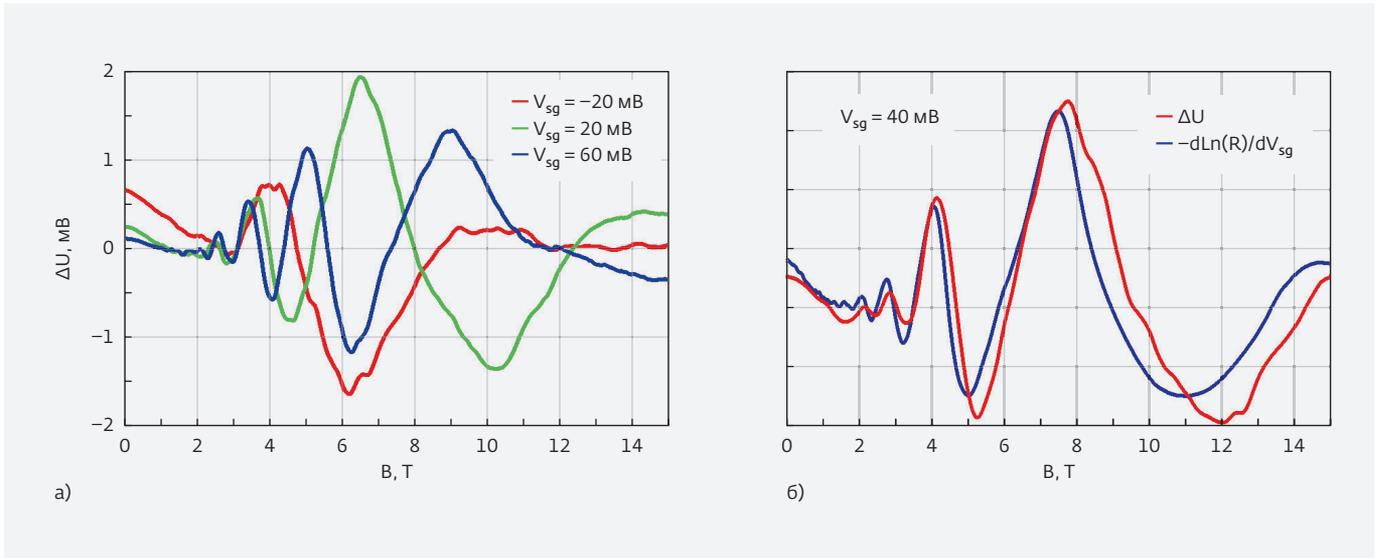
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Зависимость тока сток-исток от напряжения на затворе, измеренная при постоянном напряжении между стоком и истоком  $V_{\text{sd}}=100$  мВ, представлена на рис.3 синим цветом. Напряжение отсечки здесь составило  $V_{\text{th}}=-65$  мВ. Измеренная без магнитного поля при частоте излучения 0,94 ТГц зависимость фотоотклика от напряжения на затворе (рис.3, оранжевый) типична для случая нерезонансного детектирования. В открытом транзисторе величина фотоотклика достаточно мала, но по мере закрытия транзистора сигнал нарастает как  $1/V$  и в области напряжения отсечки достигает своего максимума. При дальнейшем уменьшении напряжения на затворе сигнал достаточно быстро спадает.

В магнитном поле зависимость сопротивления канала транзистора от магнитной индукции (рис.4а), измеренная при фиксированном напряжении на затворе, квадратична в слабых полях, а с увеличением индукции выходит на прямую, на фоне которой наблюдаются сильные осцилляции, обусловленные эффектом Шубникова-де Гааза.



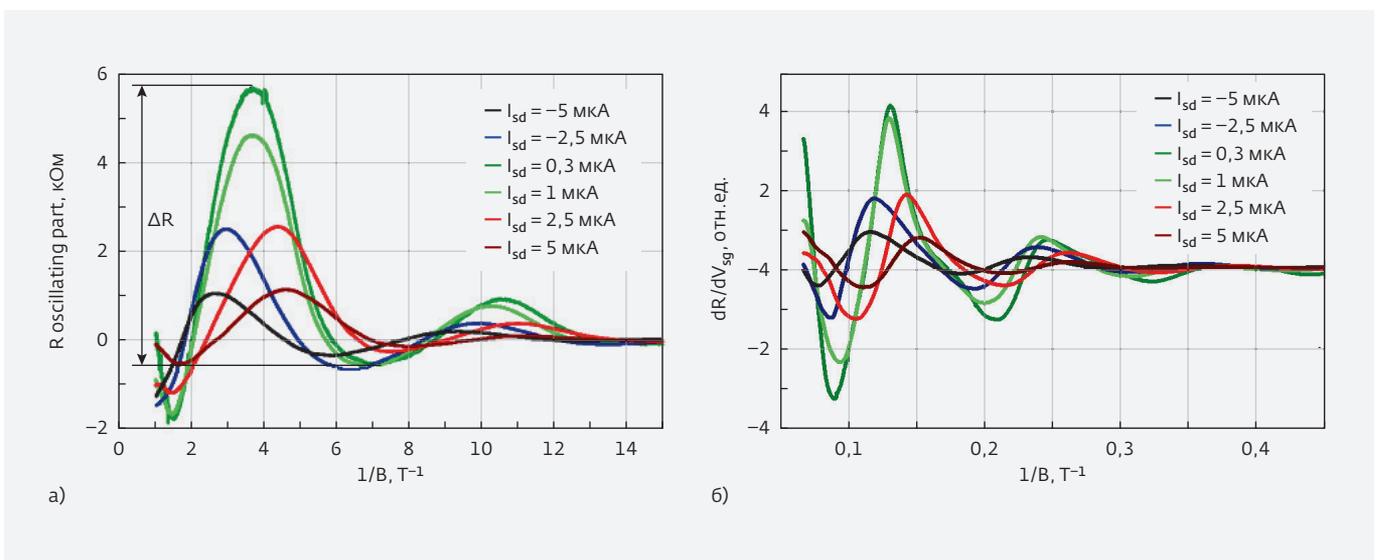
**Рис.4.** Кривые магнетосопротивления (а) и его производной по напряжению на затворе (б), измеренные при постоянном токе сток-исток  $I_{\text{sd}}=1$  мкА и напряжении на затворе  $V_{\text{sg}}=90$  мВ



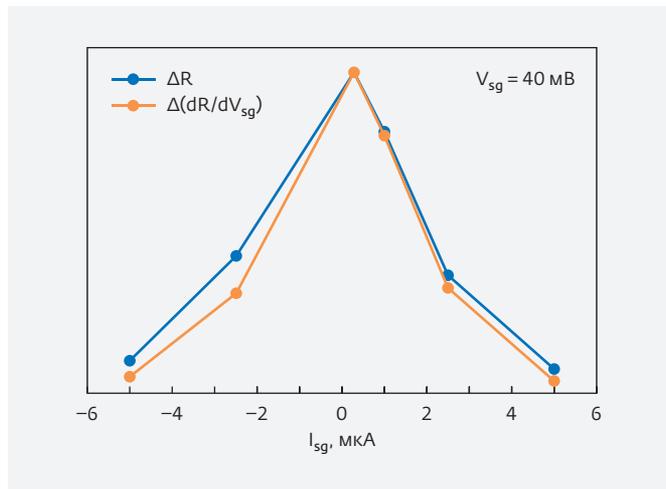
**Рис.5.** а) зависимость фотоотклика от магнитного поля при различных напряжениях на затворе  $V_{sg} = -20; 20; 60$  мВ; б) сопоставление непосредственно измеренной зависимости фотоотклика от магнитного поля и рассчитанной по формуле (3)

Измеренная зависимость фотоотклика как функция индукции магнитного поля представлена на рис.5а. В области малых полей величина фотоотклика плавно спадает с ростом индукции до примерно 2 Тл. После чего, как и в случае с производной магнетосопротивления (рис.4б), с дальнейшим ростом поля фотоотклик начинает осциллировать с изменением знака и постепенным увеличением

амплитуды осцилляций. Следует подчеркнуть, что максимальная величина фотоотклика в магнитном поле в несколько раз превышает значение фотоотклика в отсутствие поля. Максимальные значения фотоотклика, достигаемые в области  $B = 6-8$  Тл, оказываются близкими по величине при всех напряжениях на затворе, различаясь не более чем в 2 раза, в то время как в отсутствие поля такое



**Рис.6.** Осцилляции магнетосопротивления (а) и его производной по напряжению на затворе (б) в зависимости от величины постоянного тока сток-исток.  $\Delta R$  – максимальный размах осцилляций магнетосопротивления при фиксированной величине тока; напряжение на затворе  $V_{sg} = 40$  мВ



**Рис.7.** Амплитуда осцилляций магнетосопротивления и его производной по напряжению на затворе в зависимости от тока сток-исток.  $\Delta R$  – максимальный размах осцилляций магнетосопротивления (см. рис.6),  $\Delta(dR/dV_{sg})$  – производной магнетосопротивления.

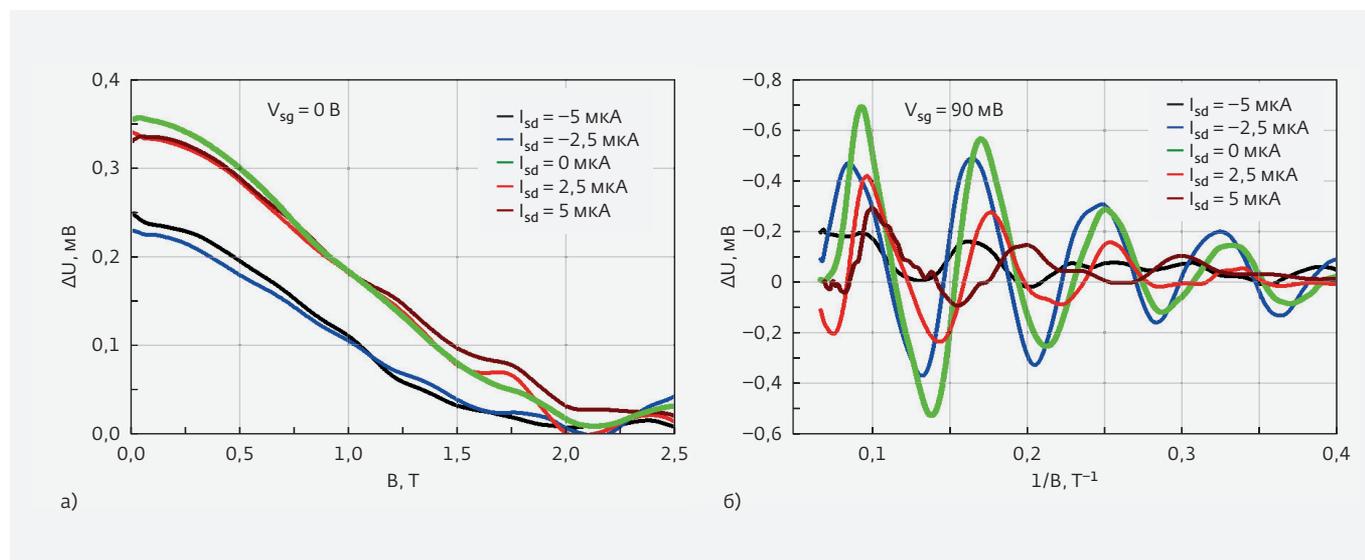
различие составляет более 10 раз. При этом максимум фотоотклика соответствует уже не закрытому транзистору ( $V_{sg} = -20$  мВ), а частично открытому ( $V_{sg} = 20$  мВ).

Влияние постоянного тока сток-исток на осцилляции магнетосопротивления и его производной по напряжению на затворе показано на рис.6 на примере кривых, измеренных при  $V_{sg} = 40$  мВ.

Хорошо видно, что максимальная амплитуда осцилляций соответствует наиболее близкой к нулю величине тока в канале, а с увеличением тока в обеих полярностях амплитуда осцилляций уменьшается. Более наглядно это показано на рис.7, на котором изображены зависимости максимального размаха осцилляций от величины постоянного тока в канале. Как видно, характер изменения амплитуды осцилляций магнетосопротивления и его производной примерно одинаков для обеих полярностей.

Влияние постоянного тока сток-исток на ТГц-фотоотклик в области малых магнитных полей, когда осцилляции еще не проявляются, показано на рис.8а. Основной эффект заключается в уменьшении фотоотклика при положительной полярности тока, в то время как при отрицательной полярности тока фотоотклик остается практически неизменным. При этом падение фотоотклика является весьма существенным и составляет примерно треть от величины сигнала в нулевом поле.

Влияние постоянного тока на фотоотклик выражено гораздо более ярко в области полей, где зависимость носит осциллирующий характер (рис.8б). Основными эффектами здесь являются значительное снижение амплитуды осцилляций с током и смещение максимумов и минимумов осцилляций вдоль магнитного поля, аналогично тому, что наблюдалось для кривых магнетосопротивления и его производной.



**Рис.8.** Зависимости фотоотклика от магнитного поля в области малых полей (а), измеренные при разных величинах постоянного тока в канале и напряжения на затворе  $V_{sg} = 0$  В, и в области квантующих полей (б), измеренные при разных значениях тока сток-исток; напряжение на затворе  $V_{sg} = 90$  мВ

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [7] было показано, что без магнитного поля нерезонансный ТГц-фотоотклик ( $\Delta U$ ) и электропроводность ( $\sigma$ ) канала полевого транзистора связаны между собой соотношением:

$$\Delta U = \frac{U_a^2}{4} \left[ \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dU} \right]_{U=U_0}, \quad (1)$$

где  $U_a$  – амплитуда переменного напряжения затвор-исток, наведенного падающим ТГц-излучением,  $U = U_{gc}(x) - U_{th}$  – разность локального напряжения затвор-канал и напряжения отсечки,  $U_0$  – приложенное постоянное напряжение затвор-исток.  $U_a$  определяется мощностью излучения и эффективностью антенны. Данное соотношение было подтверждено экспериментально для различных типов транзисторов в широком диапазоне температур (4,2–300 К) [7].

Теория ТГц фотоотклика в магнитном поле, построенная в работе [5], рассматривает двумерную плазму в канале полевого транзистора в виде электронной жидкости, описываемой гидродинамическими уравнениями, в которых влияние магнитного поля описывается параметром  $\gamma \propto \rho_{xx}$ , отображающим осциллирующий характер изменения проводимости с полем.

Итоговое выражение для фотоотклика в магнитном поле выглядит так:

$$\Delta U = \frac{1}{4} \frac{U_a^2}{U_0} \left[ f(\beta) - \frac{d\gamma}{dn} \frac{n}{\gamma} g(\beta) \right], \quad (2)$$

где  $n$  – концентрация электронов в канале,  $\beta = B/B_c$  – безразмерная величина магнитного поля в единицах циклотронного поля,  $f(\beta)$  и  $g(\beta)$  – плавно меняющиеся функции. Первое слагаемое в (2) описывает вклад в фотоотклик явления циклотронного резонанса, в то время как второе слагаемое обусловлено эффектом Шубникова-де Гааза (ШдГ) и с точностью до множителя  $ng(\beta)/U_0$  совпадает с выражением (1). В настоящей работе в области квантовых магнитных полей ( $B > 2,5$  Тл) множитель  $ng(\beta)/U_0$  можно считать постоянным по полю, поскольку в области  $1,5 < \beta < 10$   $g(\beta)$  меняется незначительно (см. [5]).

В работах [6, 8] было показано, что на качественном уровне теория Лифшиц-Дьяконова [5] хорошо описывает экспериментальные зависимости ТГц-фотоотклика от магнитного поля. Однако для количественного согласия результатов в области квантовых магнитных полей в выражении (2) необходимо ограничиться только вторым  $-d\gamma/dn$  членом.

Если выразить проводимость канала через сопротивление  $R$ , то выражение (1) преобразуется к виду:

$$\Delta U = -\frac{U_a^2}{4} \frac{1}{R} \frac{dR}{dV_{sg}}. \quad (3)$$

Справедливость данного соотношения была проверена в настоящей работе в случае наличия перпендикулярной плоскости двумерной плазмы квантового магнитного поля. На рис.5b приведены непосредственно измеренная зависимость фотоотклика от магнитного поля (красная кривая) и рассчитанная по формуле (3) исходя из полученных кривых магнетосопротивления и его производной (синяя кривая). Как видно, обе кривые хорошо согласуются во всем исследованном интервале магнитных полей 0–15 Тл с точностью до постоянного множителя  $U_a^2/4$ . Данное согласие, наблюдаемое во всем диапазоне напряжений на затворе, может служить подтверждением того, что соотношение (1) остается справедливым и в квантовом магнитном поле, перпендикулярном плоскости двумерной плазмы.

Анализ влияния постоянного тока на ТГц-фотоотклик полевого транзистора в магнитном поле был выполнен на основе теории Лифшиц-Дьяконова [5] с учетом зависимости концентрации электронов от координаты  $x$  вдоль канала (рис.1a), которую в простейшем случае можно считать линейной:

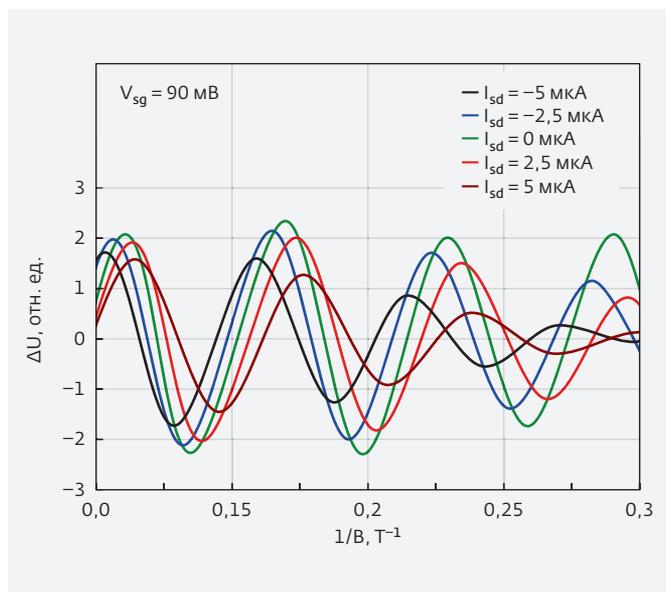
$$n(x) = n_0 + \frac{C I_{sd} R x}{e l}, \quad (4)$$

где  $n_0$  – концентрация электронов в отсутствии тока,  $C$  – емкость между затвором и каналом на единицу поверхности,  $I_{sd}$  – величина постоянного тока сток-исток,  $l$  – длина затвора.

Учитывая результаты работ [6, 8], итоговое выражение для фотоотклика при наличии постоянного тока сток-исток ( $\Delta U_1$ ) следует искать в виде интеграла:

$$\Delta U_1 = -\frac{1}{4} \frac{U_a^2}{U_0} \int_0^l \frac{d\gamma(x)}{dn} \frac{n(x)}{\gamma(x)} g(\beta) dx. \quad (5)$$

На рис.9 приведены зависимости фотоотклика от магнитного поля, рассчитанные для разных величин тока сток-исток по формуле (5). Основные эффекты влияния постоянного тока соответствуют экспериментальным данным: амплитуда осцилляций фотоотклика уменьшается с ростом абсолютной величины тока, положение экстремумов изменяется в сторону меньших магнитных полей при положительных значениях тока и в сторону



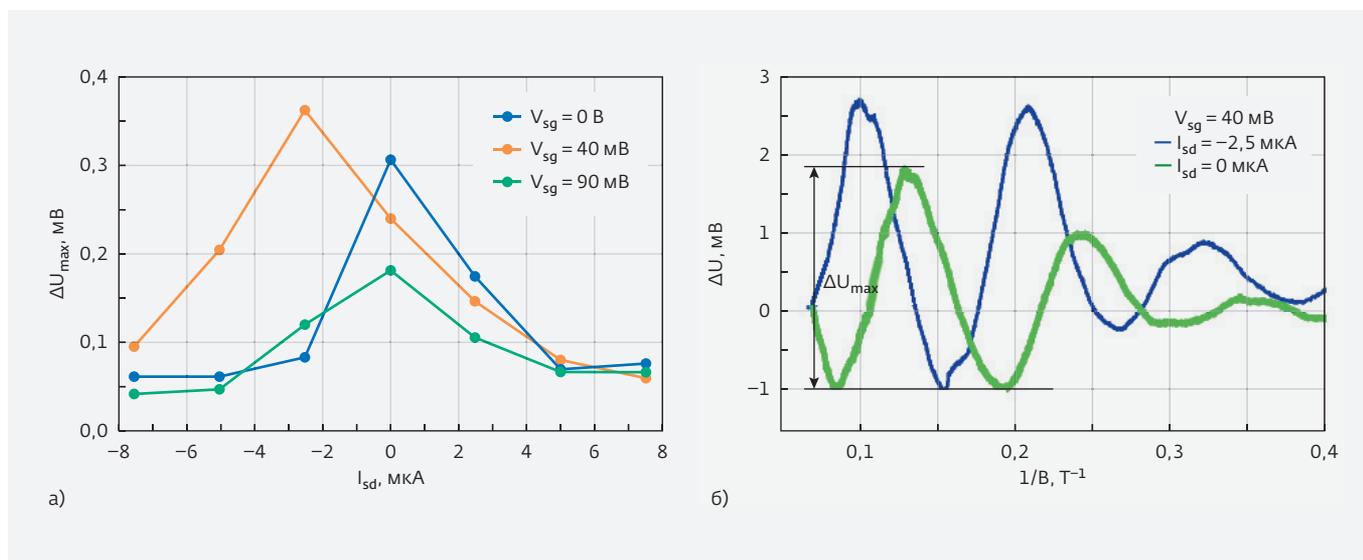
**Рис.9.** Рассчитанные по (9) зависимости фотоотклика от магнитного поля при различных величинах постоянного тока сток-исток

больших полей при отрицательных. Таким образом, наличие постоянного тока в канале полевого транзистора приводит к неоднородности распределения концентрации электронов вдоль канала, что и обуславливает наблюдаемые изменения в зависимостях ТГц-фотоотклика и сопротивления от магнитного поля под действием тока.

Однако, помимо согласующихся с теорией и имеющих наглядное объяснение общих закономерностей влияния постоянного тока на ТГц-фотоотклик в магнитных полях, в настоящей работе был зарегистрирован эффект дополнительного усиления фотоотклика током (рис.10). Было обнаружено, что в области напряжений на затворе, соответствующей промежуточному между открытым и закрытым состоянию транзистора ( $V_{sg}=30-50$  мВ), небольшой отрицательный постоянный ток в канале транзистора вызывает увеличение амплитуды осцилляций фотоотклика в магнитном поле, а следовательно, и величины сигнала. Дополнительное увеличение фотоотклика при токе  $-2,5$  мкА составило приблизительно 40%. Данный эффект является реальным увеличением фотоотклика даже по сравнению с максимумом сигнала в магнитном поле в отсутствии тока сток-исток, достигаемым при напряжении на затворе  $V_{sg}=20$  мВ (по отношению к которому увеличение составило около 20%). Природа наблюдаемого усиления ТГц фотоотклика током в магнитном поле не ясна и требует дальнейших исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа проведенных экспериментальных исследований влияния постоянного тока в канале полевого транзистора на зависимость ТГц-фотоотклика от магнитного поля можно



**Рис.10.** а) зависимость амплитуды осцилляций ТГц-фотоотклика как функции магнитного поля от величины постоянного тока сток-исток для напряжений на затворе  $V_{sg}=0; 40; 90$  мВ; б) зависимости фотоотклика от магнитного поля при напряжении на затворе  $V_{sg}=40$  мВ и токах  $I_{sd}=0; -2,5$  мкА

сформулировать следующие выводы. Во-первых, основные закономерности изменения осцилляций фотоотклика как функции магнитного поля аналогичны закономерностям изменения осцилляций магнетосопротивления, что подтверждает ранее установленную глубокую связь природы этих явлений, обусловленную особенностями изменения плотности состояний и времени релаксации электронов в магнитном поле. Во-вторых, несмотря на общую тенденцию уменьшения максимальной величины фотоотклика в магнитном поле с увеличением постоянного тока в канале, при определенных условиях наличие тока сток-исток дает дополнительное увеличение (приблизительно на 40%) высокочастотного фотоотклика транзистора в магнитном поле, хотя амплитуда осцилляций магнетосопротивления при этом уменьшается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Dyakonov M.I., Shur M.S.** Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor and new mechanism of plasma wave generation by dc current // *Physical Review Letters*. 1993. V. 71. P. 2465–2468.
2. **Dyakonov M.I., Shur M.S.** Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1996. V. 43. P. 380–386.
3. **Кнап W., Coquillat D., Dyakonova N., Teppe F., Klimenko O., Videlier H., Nadar S., Łusakowski J., Valusis G., Schuster F., Giffard B., Skotnicki T., Gaquière C., El Fatimy A.** Plasma excitations in field effect transistors for terahertz detection and emission // *Comptes Rendus Physique*. 2010. V. 11. № . 7–8. P. 433–443.
4. **Veksler D., Teppe F., Dmitriev A.P., Kachorovskii V.Yu., Knap W., Shur M.S.** Detection of terahertz radiation in gated two-dimensional structures governed by dc current // *Physical Review B*. 2006. V. 73. P. 125328.
5. **Lifshits M.B., Dyakonov M.I.** Photovoltaic effect in a gated two-dimensional electron gas in magnetic field // *Physical Review B*. 2009. V. 80. P. 121304 (R).
6. **Klimenko O.A., Mityagin Yu.A., Videlier H., Teppe F., Dyakonova N.V., Consejo C., Bollaert S., Murzin V.N., Knap W.** Terahertz response of InGaAs field effect transistors in quantizing magnetic fields // *Applied Physics Letters* 2010. V. 97. P. 022111.
7. **Sakowicz M., Lifshits M.B., Klimenko O.A., Schuster F., Coquillat D., Teppe F., Knap W.** Terahertz responsivity of field effect transistors versus their static channel conductivity and loading effects // *Journal of Applied Physics* 2011. V. 110. P. 054512.
8. **Bouanga-Tombet S., Sakowicz M., Coquillat D., Teppe F., Knap W., Dyakonov M. I., Karpierz K., Łusakowski J., Grynberg M.** Terahertz radiation detection by field effect transistor in magnetic field // *Applied Physics Letters* 2009. V. 95. P. 072106.

# МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОНОВ И ПРИРОДА ЛОВУШЕК В ТОНКИХ СЛОЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКСИДА НА КРЕМНИИ ПОСЛЕ ПРОТЕКАНИЯ ЗАРЯДА

► В.А.Гриценко<sup>1, 2</sup>, Д.Р.Исламов<sup>1, 2</sup>, О.М.Орлов<sup>3, 4</sup>, Г.Я.Красников<sup>3, 4</sup>, Е.Н.Морозов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ИФП им. А.В.Ржанова СО РАН, <sup>2</sup>НГУ, <sup>3</sup>АО "НИИМЭ", <sup>4</sup>АО "НИИМЭ и МИКРОН"

Экспериментально изучено явление SILC (Stress Induced Leakage Current) в термическом оксиде кремния. Показано, что в режиме SILC транспорт заряда в  $\text{SiO}_2$  лимитируется фонон-облегченным туннелированием между ловушками, в качестве которых выступают вакансии кислорода. При протекании заряда происходит генерация вакансий кислорода, что увеличивает токи утечки. Оценены термическая и оптическая энергии ловушки. Выявлено, что длительный отжиг при повышенной температуре приводит к рекомбинации вакансий кислорода с междоузельным кислородом и уменьшению токов утечки до начального уровня.

## MECHANISM OF ELECTRON TRANSPORT AND TRAP NATURE IN THIN LAYERS OF THERMAL OXIDE ON SILICON AFTER CHARGE FLOWING

V.A.Gritsenko<sup>1, 2</sup>, D.R.Islamov<sup>1, 2</sup>, O.M.Orlov<sup>3, 4</sup>, G.Ya.Krasnikov<sup>3</sup>, E.N.Morozov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Rzhanov IPh SB RAS, <sup>2</sup>NSU, <sup>3</sup>JSC MERI, <sup>4</sup>Mikron JSC

SILC phenomenon in thermal silica was studied experimentally. It is shown that the charge transport mechanism in SILC is phonon-assisted tunneling between traps, and oxygen vacancies act as the traps. The flow of charge through  $\text{SiO}_2$  generates oxygen vacancies, increasing the leakage currents. Thermal and optical trap energies were evaluated. It was revealed that long-time annealing at high temperature leads to recombination of oxygen vacancies with interstitial oxygen and reduction of leakage currents to initial level.

## ВВЕДЕНИЕ

Перепрограммирование элементов флеш-памяти с плавающим затвором, элементов флеш-памяти на основе нитрида кремния  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$  (SONOS) и  $\text{TaN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  (TANOS) осуществляется за счет туннельной инжекции электронов и дырок через туннельный оксид кремния толщиной 1,8–8,0 нм [1, 2]. Протекание тока через туннельный оксид в режиме перепрограммирования при приложении сильного ( $\approx 10^7$  В/см) электрического поля приводит к увеличению проводимости оксида при низких значениях электрического поля ( $\approx 10^6$  В/см). При этом возникает избыточная компонента тока

через туннельный диэлектрик по сравнению с током, протекающим в сильном электрическом поле по механизму Фаулера-Нордгейма [3]. Это явление называют Stress Induced Leakage Current (SILC). SILC ограничивает число циклов перепрограммирования элементов флеш-памяти с плавающим затвором и на основе нитрида кремния до  $10^4$ – $10^5$  [2]. SILC приводит так же к ускорению стекания заряда в элементах флеш-памяти в режиме хранения информации, то есть деградации запоминающих свойств. Несмотря на то, что экспериментальному и теоретическому изучению SILC посвящено большое число работ [4–7], природа этого

эффекта является дискуссионным вопросом. В работах [5, 6] предложена многофононная модель транспорта заряда в SILC. Эта модель не является аналитической и требует сложных численных расчетов для описания транспорта заряда в SILC. В настоящее время неясной является природа ловушек, ответственных за SILC.

В представленной работе экспериментально и теоретически изучается механизм SILC, обсуждается природа ловушек, ответственных за SILC, и определяются параметры ловушек.

### ОБРАЗЦЫ

На рис.1 приведены поперечные и продольные разрезы структуры исследуемых образцов. Тестовые структуры изготавливались по 180 нм КМОП-технологии. В качестве подложки использовался p-кремний с карманом p-типа с сопротивлением около 60 Ом/□. Стоки-истоки тестовой структуры (в области контактов) представляли собой легированные имплантацией n<sup>+</sup>-типа области кремния с сопротивлением около 7 Ом/□ (силицидированная область). Толщина туннельного SiO<sub>2</sub> составляла 75 Å. В качестве верхней обкладки конденсатора выступал первый уровень поликремния n<sup>+</sup>-типа. Толщина слоя poly-Si составляла 1000±100 Å, сопротивление – 500±200 Ом/□. Тестовые образцы состояли из 16 параллельно соединенных структурных конденсаторов (массив 2×8). Ширина одного конденсатора составляла 40 мкм, ширина – 125 мкм. Общая площадь поликремниевого электрода равна 80 000 мкм<sup>2</sup>. Плотность тока, используемого для изучения SILC, составляла 1 мА/см<sup>2</sup>. Через туннельный оксид кремния протекали заряды величиной 0,01, 0,1, 1, 3 и 10 Кл/см<sup>2</sup>. Температура при измерениях имела значения: 25°C и 70°C.

### ТУННЕЛЬНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ОКСИД КРЕМНИЯ

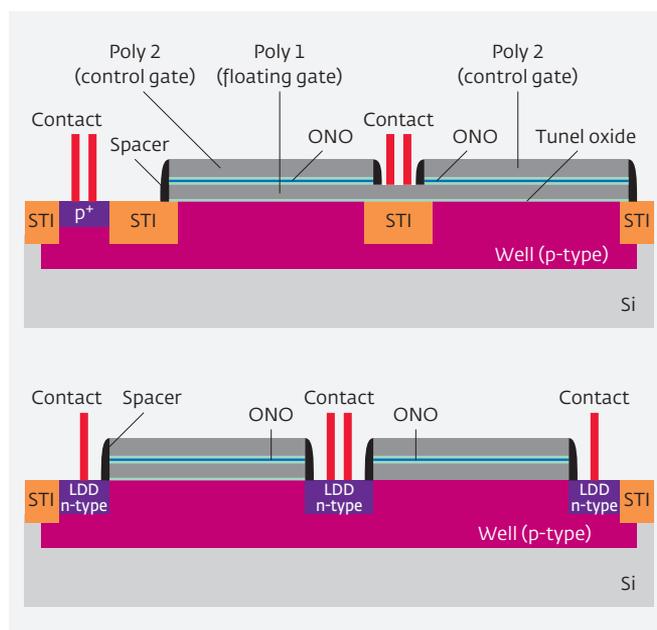
Перепрограммирование элемента флеш-памяти с плавающим затвором осуществляется за счет туннельной инжекции электронов через термический оксид кремния в плавающий затвор и обратно [2]. Выражение для тока при инжекции электронов из металла по механизму Фаулера-Нордгейма имеет вид [8, 9]:

$$J_{FN} = A^2 \exp\left(-\frac{B\sqrt{m^*}\Phi_0^{3/2}}{F}\right), \quad (1)$$

$$A = \frac{e^3}{8\pi\hbar\Phi_0}, B = \frac{8\pi\sqrt{2}}{3\hbar e},$$

где  $J_{FN}$  – плотность тока,  $F$  – электрическое поле,  $m^*$  – туннельная эффективная масса,  $\Phi_0$  – высота треугольного потенциального барьера для электронов на границе Si/SiO<sub>2</sub>,  $e$  – заряд электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного оксида толщиной 7,5 нм до деградации представлены на рис.2а. Видно, что зависимость тока от приложенного напряжения (а значит и от электрического поля) экспоненциальная при  $|U| > 5$  В. В слабых электрических полях ( $|U| < 5$  В) ток не зависит от приложенного напряжения и лимитируется проводящими объемными свойствами подложки и поликремниевого затвора. Эти же данные в координатах, соответствующих закону Фаулера-Нордгейма, представлены на рис.2б символами. По данным фотоэмиссионных измерений, высота барьера на границе равна  $\Phi = 3,14$  эВ [10]. Эффективная заниженная высота барьера  $\Phi = 2,9$  эВ получается из-за квантования электронного спектра свободных носителей в кремнии на границе Si/SiO<sub>2</sub> в сильном электрическом



**Рис.1.** Тестовая структура. Сверху: поперечный разрез структуры; контакты слева (контакт к p-карману) – нижний электрод структуры; контакты в центре (контакт к первому уровню poly-Si) – затвор, верхний электрод структуры. Снизу: продольный разрез структуры; контакты слева, в центре, справа – контакты к легированным n<sup>+</sup>-Si активным областям (стокам/истокам). Элементы структуры ONO и poly 2 не использовались. STI (Shallow trench isolation) – изолирующие области

поле [11]. При величине барьера  $\Phi_0=2,9$  эВ, эффективная масса электрона в  $\text{SiO}_2$  получается равной  $m^*/m_e=0,5 \pm 0,02$  при обеих полярностях. Эта величина хорошо согласуется со значением  $m^*/m_e=0,5$ , полученным в [11, 12].

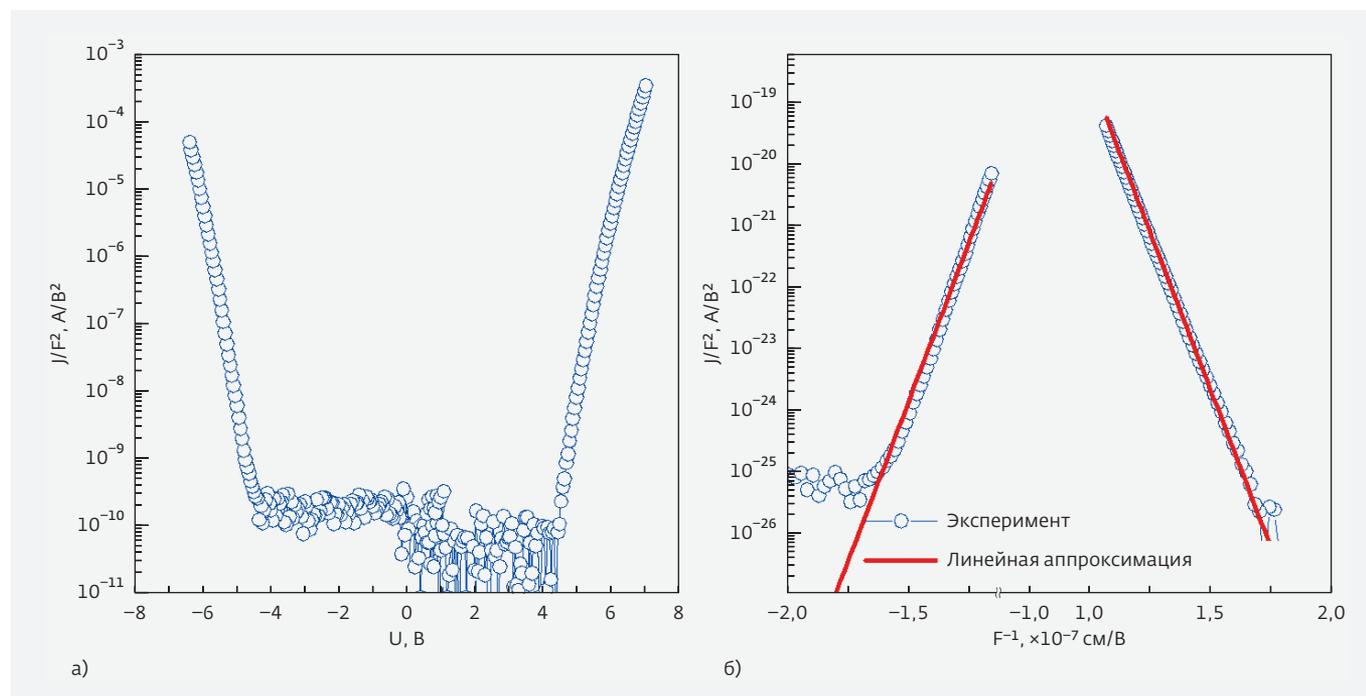
### ПЕРЕНОС ЗАРЯДА ТУННЕЛИРОВАНИЕМ МЕЖДУ ЛОВУШКАМИ

При протекании сильного тока через слой  $\text{SiO}_2$  вследствие неупругих столкновений электронов с атомами решетки в оксиде формируются дефекты, которые могут выступать в роли центров локализации носителей заряда – ловушек. В модели переноса Шокли-Рида-Холла предполагается, что носитель заряда (для определенности будем иметь в виду электрон) из контакта инжектируется в зону проводимости диэлектрика и в объеме поглощается ловушкой. Затем захваченный (локализованный) электрон может перейти в зону проводимости и снова локализоваться на другой свободной ловушке, ниже по полю. Переходный процесс продолжается до тех пор, пока скорость заполнения свободных ловушек не сравняется со скоростью ионизации заполненных ловушек. После чего наступает стационарный процесс переноса заряда.

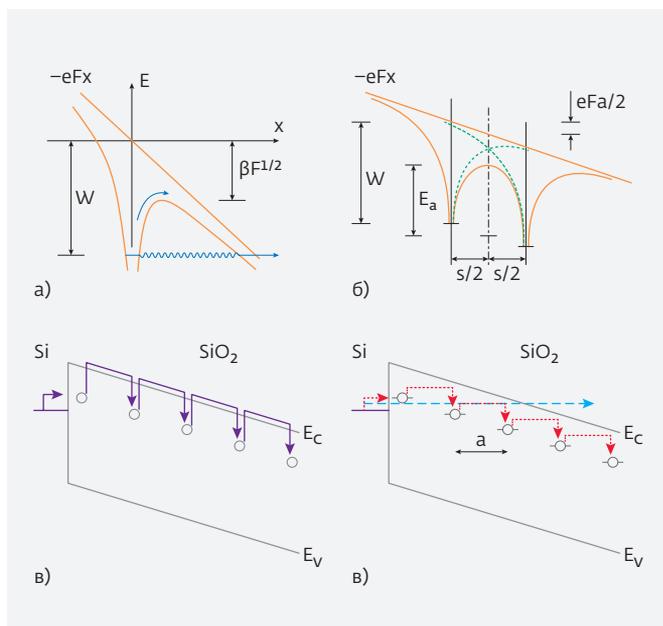
Локализованный на ловушке электрон может покинуть ее в процессе ионизации ловушки при понижении потенциального барьера во внешнем электрическом поле. Модель термической ионизации при понижении потенциального барьера изолированного кулоновского центра (сплошная стрелка на рис.3а), предложенная Френкелем в 1938 году, объясняет экспоненциальный характер зависимости тока от внешнего электрического поля (закон Пула) [13, 14]:

$$P = \nu \exp\left(-\frac{W - \beta\sqrt{F}}{kT}\right), \quad \beta = \sqrt{\frac{e^3}{\pi\epsilon_0\epsilon_\infty}}, \quad (2)$$

где  $P$  – частота ионизации ловушки,  $\nu$  – частотный фактор, определенный Френкелем  $\nu=W/h$  [13],  $W$  – энергия ионизации ловушки,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума),  $\epsilon_\infty$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость оксида кремния ( $\epsilon_\infty=2,14$ ). Волнистой стрелкой на рис.3а изображен процесс туннелирования через пониженный барьер. Однако, вероятность такого процесса существенна при температурах ниже 200 К и при комнатной (и выше) температуре им можно пренебречь. При увеличении концентрации ловушек среднее



**Рис.2.** Экспериментальные вольт-амперные характеристики  $\text{SiO}_2$  толщиной 7,5 нм до деградации при двух полярностях напряжения на poly-Si электроде (а). Те же данные представлены символами в координатах Фаулера-Нордгейма (б); линии соответствуют линейной аппроксимации при  $m^*=0,5 m_e$



**Рис.3.** Энергетические диаграммы переноса заряда в туннельном оксиде: а) ионизация изолированного кулоновского центра (сплошная стрелка иллюстрирует термическую ионизацию, волнистая – туннелирование через пониженный барьер); б) перекрывающиеся кулоновские центры; в) многофононная ионизация изолированной нейтральной ловушки; г) фонон-облегченное туннелирование между ловушками (стрелкой с крупным пунктиром показано туннелирование по Фаулеру-Нордгейму, стрелками с частым штрихом проиллюстрировано туннелирование между ловушками)

расстояние между ними становится настолько мало, что перекрытие кулоновских центров приводит к большому понижению энергетического барьера для ионизации (рис.3б). Математическое описание такого процесса было построено Робертом Хиллом [15]:

$$P = \nu \exp\left(-\frac{W - e^2/\pi\epsilon_0\epsilon_z a}{kT}\right) \sinh\left(\frac{eFa}{2kT}\right), \quad (3)$$

где  $a$  – расстояние между ловушками (на рис.3б). Согласно рассмотренным моделям (2) и (3), при ионизации ловушка становится положительно заряженной, а электрон может впоследствии локализоваться на другую пустую (т.е. положительно заряженную) ловушку. Таким образом, для транспорта носителей заряда эти модели требуют наличия достаточного количества положительно заряженных ловушек в диэлектрическом слое.

Для устранения этого требования в транспортных процессах помимо электронов необходимо учитывать другие квазичастицы – фононы. Модель многофононной ионизации изолированной нейтральной ловушки (рис.3в) также описывает экспоненциальную зависимость тока от внешнего электрического поля [16]:

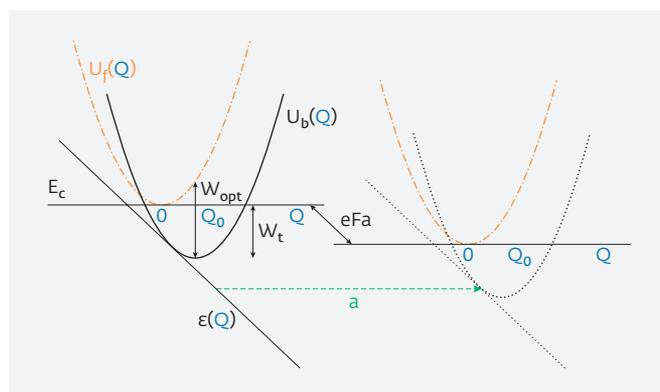
$$P = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{nW_{ph}}{2kT} - \text{Scoth}\frac{W_{ph}}{2kT}\right) I_n\left(\frac{S}{\sinh(W_{ph}/2kT)}\right) P_i(W_t + W_{ph}),$$

$$S = \frac{W_{opt} - W_t}{W_{ph}}, \quad (4)$$

$$P_i = \frac{eF}{2\sqrt{2m^*}W} \exp\left(-\frac{3\sqrt{2m^*}}{4\hbar eF} W^{3/2}\right),$$

где  $I_n$  – модифицированные функции Бесселя,  $W_{ph}$  – энергия фонона,  $W_t$  – термическая энергия ионизации ловушек,  $W_{opt}$  – оптическая энергия ионизации ловушек,  $\hbar = h/2\pi$ ,  $P_i(W)$  – частота туннелирования через треугольный барьер высоты  $W$ .

Однако, когда концентрация ловушек велика и расстояние между ними мало, электрон может туннелировать между соседними ловушками без выхода в зону проводимости, как показано на рис.3г [17, 18]. На рис.4 продемонстрирована диаграмма туннелирования электрона из одной фонон-связанной ловушки в другую на расстояние  $a$  в присутствии внешнего электрического поля  $F$ .



**Рис.4.** Конфигурационная диаграмма туннелирования электрона из одной фонон-связанной ловушки в другую на расстояние  $a$  в присутствии внешнего электрического поля  $F$ . Сплошные линии соответствуют начальному состоянию системы до туннелирования, пунктирные – конечному, после туннелирования. Горизонтальная штриховая прямая отображает туннельный переход электрона из одной ловушки в другую

Сплошные линии соответствуют начальному состоянию системы (до туннелирования), пунктирные – конечному состоянию системы (после туннелирования). Законы дисперсии системы электрон-фононы, локализованные на ловушках, изображены черными параболоми  $U_b(Q)$ , красные параболы  $U_f(Q)$  соответствуют законам дисперсии электронов в зоне проводимости (здесь  $Q$  – конфигурационная координата). Во внешнем поле уровни электронов (наклонные линии) в соседних ловушках не совпадают, и поэтому туннельный переход должен сопровождаться неупругими процессами – испускания или поглощения фононов решетки, – для того, чтобы скомпенсировать разность энергий. Модель фонон-связанной ловушки учитывает это обстоятельство. В рамках этой модели частота туннельного перехода между ловушками  $P_{\text{tunn}}$  определяется уравнением (5) [17, 18]:

$$P_{\text{tunn}}(x,t) = \frac{\sqrt{\pi}\hbar W_t}{m^* a^2 Q_0 \sqrt{kT}} \exp\left(-\frac{2a\sqrt{2m^* W_t}}{\hbar}\right) \times \exp\left(-\frac{W_{\text{opt}} - W_t}{2kT}\right) \sinh\left(\frac{eF(x,t)a}{2kT}\right). \quad (5)$$

Здесь  $t$  – время,  $x$  – координата поперек пленки,  $a$  – расстояние между ловушками (на рис.3г),  $Q_0 = \sqrt{2(W_{\text{opt}} - W_t)}$ . При высоких температурах для одномерной модели перенос заряда описывается одномерным монополярным уравнением Шокли-Рида-Холла

$$\frac{\partial n_t(x,t)}{\partial t} = \frac{\sigma J_{\text{tunn}}}{e} (N - n_t(x,t)) - n_t(x,t) P_{\text{tunn}}(x,t) \quad (6)$$

и уравнением Пуассона

$$\frac{\partial F(x,t)}{\partial x} = -\frac{en_t(x,t)}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (7)$$

где  $n_t(x,t)$  – концентрация заполненных ловушек,  $N = a^{-3}$  – концентрация ловушек,  $\sigma$  – сечение захвата нейтральной ловушки ( $\sigma = (1-2) \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2}$  для электронов [29],  $\sigma = 3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}$  для дырок [20]),  $J_{\text{tunn}}$  – вклад фонон-облегченного туннелирования в плотность тока,  $\epsilon$  – низкочастотная диэлектрическая проницаемость оксида кремния, ( $\epsilon = 3,9$ ). В стационарном случае ( $\partial n_t(x,t) / \partial t = 0$ ) выражение (6) приобретает вид вольт-амперной характеристики:

$$J_{\text{tunn}} = \frac{en_t(x)}{\sigma(N - n_t(x))} P_{\text{tunn}}(x). \quad (8)$$

Заметим, что в уравнении (8) величина  $J_{\text{tunn}}$  является инвариантом координаты  $x$ , так как

в стационарном случае накопления заряда в объеме диэлектрика нет.

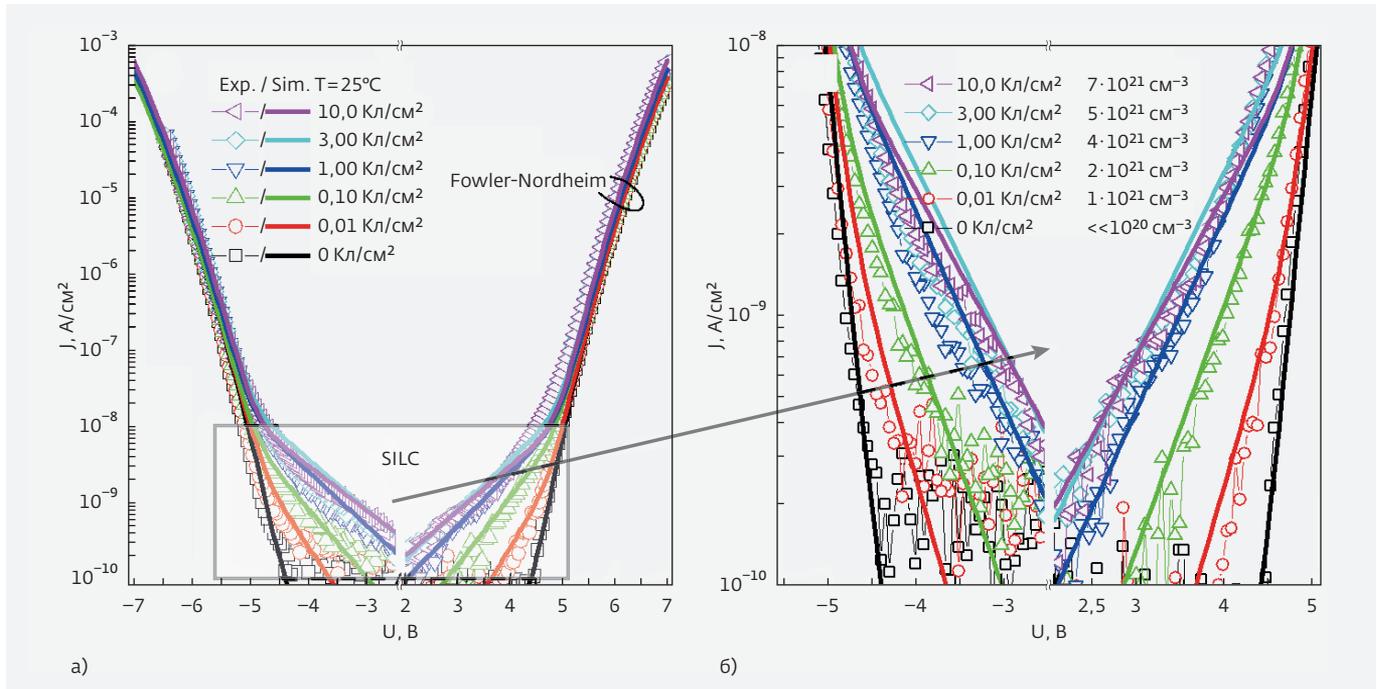
При повышении концентрации ловушек ток утечки через туннельный  $\text{SiO}_2$  увеличивается. Логарифм тока пропорционален электрическому полю (закон Пула). Из наклона ВАХ в полулогарифмическом масштабе можно определить концентрацию ловушек.

На рис.5 символами представлены экспериментальные вольт-амперные характеристики структуры poly-Si/SiO<sub>2</sub>/p-Si при разных величинах заряда, протекшего через оксид кремния для двух полярностей потенциала на поликристаллическом кремнии. В сильных полях при  $|U| > 5$  В проводимость SiO<sub>2</sub> лимитируется туннелированием электронов из кремниевой подложки в оксид кремния по механизму Фаулера-Нордгейма (1). При напряжениях  $|U| < 2,5$  В ток лимитируется процессами переноса заряда в объеме подложки p-Si и чувствительностью измерительных приборов. При напряжениях  $2,5 \text{ В} < |U| < 5 \text{ В}$  в оксиде кремния протекает SILC, величина которого возрастает с ростом величины протекшего заряда электронов. Наклон вольт-амперных характеристик уменьшается при увеличении величины протекшего через диэлектрик заряда.

Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются теорией при использовании следующего выражения для суммарного тока:

$$J = J_{\text{FN}} + J_{\text{tunn}}. \quad (9)$$

Результаты моделирования (линии) в сравнении с экспериментальными данными (символы) приведены на рис.5. При моделировании ветки, описываемой туннелированием по Фаулеру-Нордгейму (1), использовались значения эффективной массы для электрона  $m^*/m_e = 0,5$  и эффективной высоты барьера для электронов на границе Si/SiO<sub>2</sub>  $\Phi_0 = 2,9$  эВ. Вольт-амперные характеристики SILC при обоих полярностях потенциала удовлетворительно описываются моделью фонон-облегченного туннелирования электронов между ловушками. Количественное согласие экспериментальных и расчетных ВАХ в режиме SILC наблюдается при величинах термической и оптической энергий ловушек в оксиде кремния  $W_t = 1,6$  эВ и  $W_{\text{opt}} = 3,2$  эВ, эффективной массы для электрона  $m^*/m_e = 0,5$ . В модели фонон-облегченного туннелирования нарастание тока с увеличением протекшего заряда объясняется повышением концентрации ловушек. Значения полной концентрации ловушек и заполненных ловушек при увеличении протекшего



**Рис.5.** Вольт-амперные характеристики структуры poly-Si/SiO<sub>2</sub>/p-Si при комнатной температуре и разных величинах заряда, протекшего через SiO<sub>2</sub>: а) общий вид, б) область SILC. Символами представлены экспериментальные данные, линии соответствуют результатам моделирования (9). Величины протекшего заряда и соответствующие им концентрации дефектов приведены на врезке

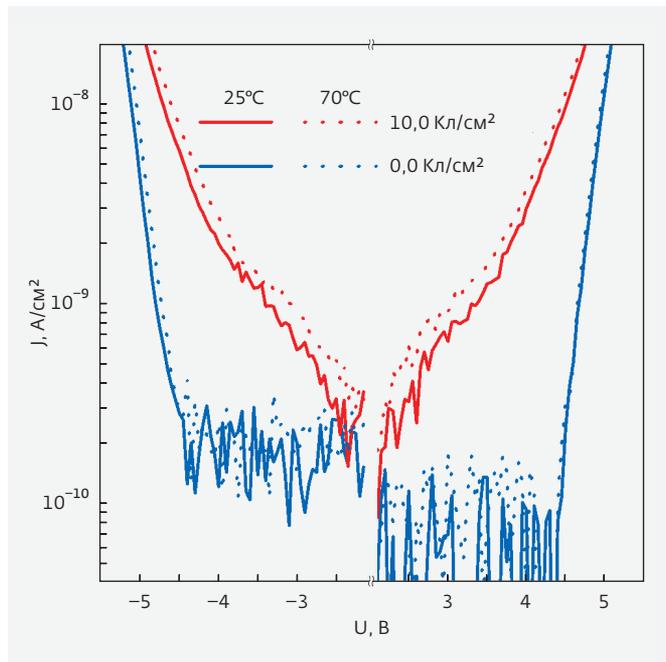
заряда приведены в табл.1. Следует отметить, что концентрации заполненных ловушек на пять-семь порядков меньше, чем суммарная концентрация ловушек, образовавшихся при протекании SILC. Поэтому, согласно уравнению (7), неоднородностями электрического поля в режиме SILC можно пренебречь ( $F(x,t)=const$ ).

Модель Френкеля (2) качественно может описать экспериментальные данные, однако при моделировании требуется предположить, что при

SILC-стрессе увеличивается диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\infty}$ . Количественный анализ показал, что по мере увеличения протекшего заряда значение  $\epsilon_{\infty}$  должно вырасти до 20–30, что значительно больше оптической диэлектрической проницаемости оксида кремния 2,14. Анализ экспериментальных данных в рамках модели перекрывающихся кулоновских центров (3) дает значения концентрации ловушек, как и фонон-облученное туннелирование между ловушками, но при аномально малом

**Таблица 1.** Значения параметров при моделировании SILC

	Протекший через структуру заряд $\Sigma$ , Кл/см <sup>2</sup>					
	0	0,01	0,1	1	3	10
$W_t$ , эВ	1,6					
$W_{opt}$ , эВ	3,2					
$\sigma$ , см <sup>-2</sup>	$10^{-13}$					
$N$ , см <sup>-3</sup>	$<<10^{20}$	$1 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$	$7 \cdot 10^{20}$
$n_t$ , см <sup>-3</sup>	–	$6 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$
$n_t/N$	–	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

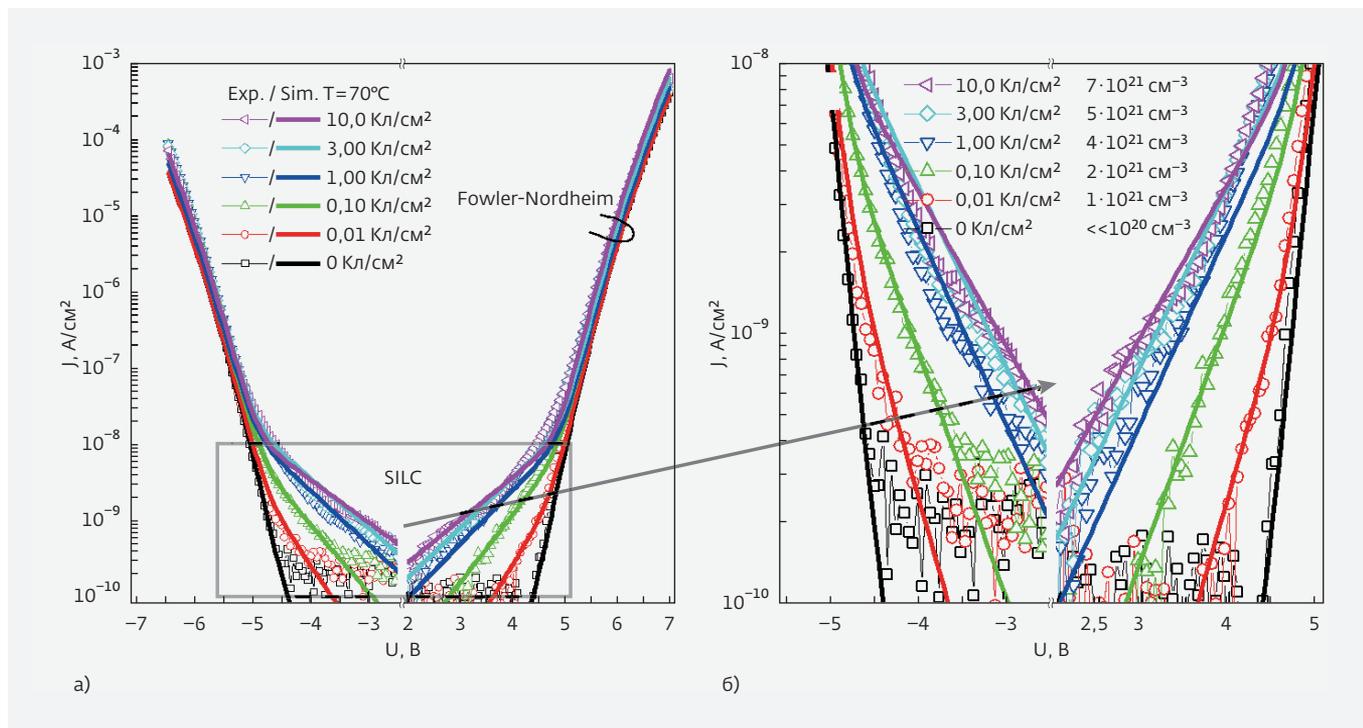


**Рис.6.** Экспериментальные вольт-амперные характеристики структуры poly-Si/SiO<sub>2</sub>/p-Si при различных температурах и величинах заряда, протекшего через SiO<sub>2</sub>

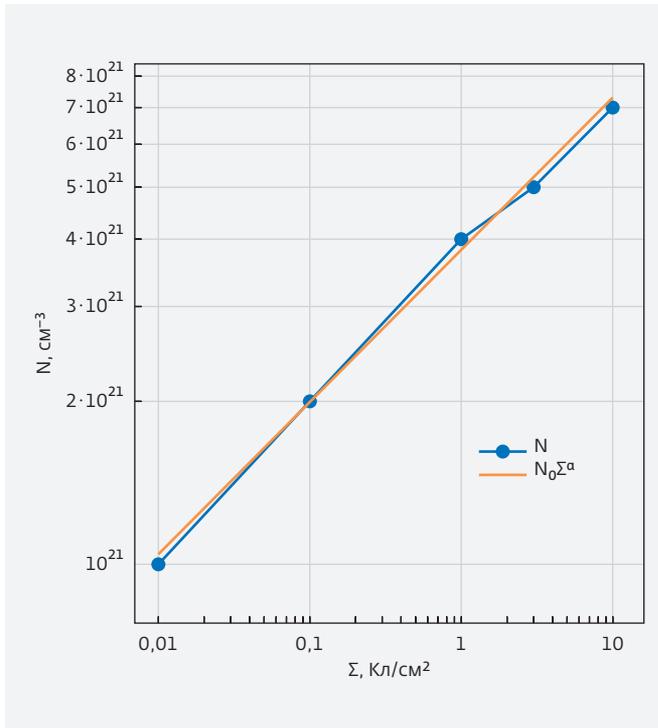
частотном факторе  $\nu \approx 10^{-80} \cdot W/\hbar$ . Наклон ВАХ в полулогарифмических координатах в модели многофононной ионизации ловушки (4) определяется эффективной массой, и изменение наклона ВАХ в режиме SILC можно объяснить только увеличением значения  $m^*$  до  $(10-25) m_e$ , что так же нефизично, как anomalно большая диэлектрическая проницаемость или anomalно малый частотный фактор. Принимая во внимание выше приведенные аргументы, можно сделать вывод о корректности выбора модели (5) для описания транспорта в режиме SILC.

Повышение температуры приводит к увеличению SILC на 30-50%. Это явление количественно описывается моделью фонон-облегченного туннелирования между ловушками (5). Для иллюстрации этого на рис.6 приведены экспериментально измеренные ВАХ при температурах 25°C и 70°C и двух полярностях потенциала на поликремниевом затворе до и после протекания заряда. Видно, что при повышении температуры ток значительно возрастает.

На рис.7 представлены экспериментальные вольт-амперные характеристики туннельного оксида, измеренные при повышенной температуре 70°C.



**Рис.7.** Вольт-амперные характеристики структуры poly-Si/SiO<sub>2</sub>/p-Si при температуре 70°C и разных величинах заряда, протекшего через SiO<sub>2</sub>: а) общий вид, б) область SILC. Символами представлены экспериментальные данные, линии соответствуют результатам моделирования (9)



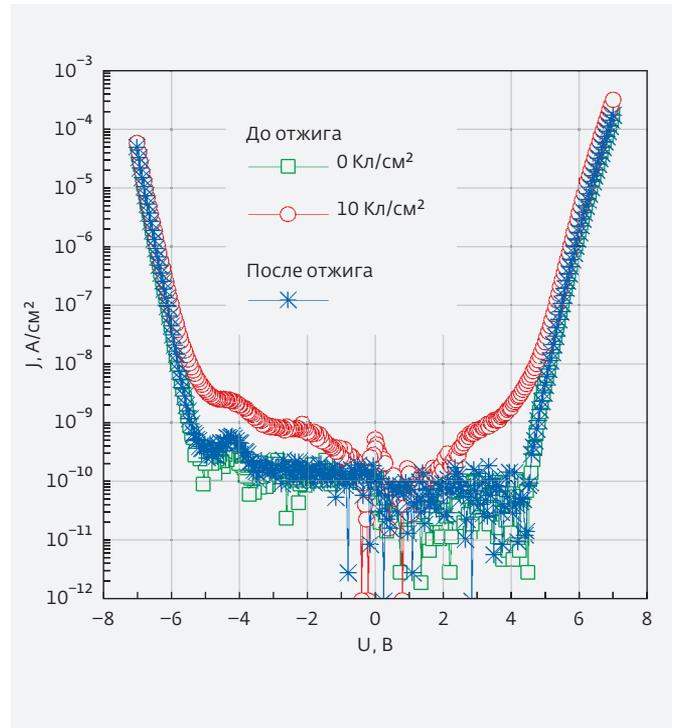
**Рис.8.** Зависимость концентрации ловушек от протекшего через туннельный SiO<sub>2</sub> заряда

Результаты моделирования ВАХ в режимах Фаулера-Нордгейма и SILC в рамках фонон-облегченного туннелирования между ловушками представлены на рис.7 линиями. Количественное совпадение расчетных кривых с экспериментальными данными достигается при значениях параметров, полученных при моделировании ВАХ при комнатной температуре (табл.1). Вышеприведенные аргументы доказывают корректность выбранной модели фонон-облегченного туннелирования между ловушками для описания SILC.

На рис.8 символами приведена зависимость концентрации ловушек  $N$  от протекшего через туннельный SiO<sub>2</sub> заряда  $\Sigma$  в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что точки в указанных координатах находятся на прямой линии, что соответствует степенной зависимости:

$$N = N_0 \left( q / 1 \text{ Кл.} / \text{см}^2 \right)^\xi \quad (10)$$

Красной линией на рис.8 приведен результат подгонки (10) со значениями параметров  $N_0 = 3,8 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и  $\xi = 0,28$ . Физический смысл этих констант может быть прояснен в результате моделирования кинетики образования дефектов, выступающих в роли ловушек, при протекании заряда



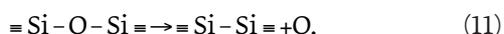
**Рис.9.** Экспериментальные вольт-амперные характеристики структуры poly-Si/SiO<sub>2</sub>/p-Si при температуре 25°C и разных величинах заряда, протекшего через SiO<sub>2</sub> до отжига (геометрические символы) и после термического отжига в течение 120 ч при 250°C (крестообразные символы)

через диэлектрический слой. Однако эта задача остается за рамками настоящей работы и требует отдельного исследования.

После протекания SILC тестовые образцы были подвергнуты отжигу при 250°C в течение 120 ч. Сравнение экспериментальных ВАХ до и после отжига приведено на рис.9. Сравнение экспериментальных вольт-фарядных характеристик (ВФХ) до и после отжига показало, что ВАХ- и ВФХ-структуры после термического отжига совпадают с контрольными характеристиками, измеренными до SILC-стресса. Это указывает на то, что состояние туннельного слоя SiO<sub>2</sub> после отжига такое же, как у "свежей" структуры, то есть концентрация дефектов при отжиге уменьшается до начального значения. Это явление открывает возможность контролируемо подавлять токи утечки, вызванные деградацией туннельного SiO<sub>2</sub> после протекания заряда.

## ПРИРОДА ЛОВУШЕК, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА SILC

Предполагается, что в качестве ловушек, ответственных за SILC в туннельном оксиде кремния выступают вакансии кислорода, или Si-Si-связи. Si-Si-связи в SiO<sub>2</sub> образуются по реакции:



Здесь знак (-) обозначает нормальную химическую связь, образованную двумя электронами. Электронная структура Si-Si-связи в SiO<sub>2</sub> изучалась в многочисленных работах [20-26]. Связующая  $\sigma$ -орбиталь Si-Si-связи, заполненная двумя электронами, совпадает с верхом валентной зоны SiO<sub>2</sub>. Антисвязующая незаполненная  $\sigma^*$ -орбиталь Si-Si-связи локализована вблизи дна зоны проводимости.

В SiO<sub>2</sub> наблюдается ультрафиолетовая полоса люминесценции с энергией 4,4 эВ. Максимум возбуждения этой полосы расположен при 7,6 эВ [20, 23]. Половина стоксовского сдвига фотолюминесценции

$$(7,6-4,4)/2=1,6 \text{ эВ}$$

дает энергию электронных и дырочных ловушек в SiO<sub>2</sub>, обусловленных вакансией кислорода, или Si-Si-связью [20]. Таким образом, совпадение термической энергии ловушек  $W_t=1,6$  эВ, определенной в экспериментах по транспорту заряда в SiO<sub>2</sub> в режиме SILC, с половиной стоксовского сдвига фотолюминесценции Si-Si-связи указывает на то, что ловушки, образующиеся в оксиде кремния после SILC обусловлены вакансиями кислорода.

Оптическая энергия ловушки  $W_{\text{opt}}=3,2$  эВ, определенная из экспериментов по транспорту заряда, во-первых, практически совпадает с энергией электронной ловушки в SiO<sub>2</sub>, определенной по туннельному растеканию заряда 3,1 эВ [27]. Во-вторых, так же, как в оксиде кремния, в других диэлектриках, таких как Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [12], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [28, 29], HfO<sub>2</sub> [30-32], эксперимент указывает на то, что при многофононном механизме ионизации оптическая энергия ловушки  $W_{\text{opt}}$  точно вдвое больше термической энергии ловушки  $W_t$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Экспериментально изучено явление SILC в оксиде кремния. Анализ экспериментальных ВАХ для структур на основе SiO<sub>2</sub> показал, что в режиме SILC транспорт перенос заряда в SiO<sub>2</sub> лимитируется фонон-облегченным туннелированием между

ловушками. Установлено, что в качестве ловушек, ответственных за SILC, выступают вакансии кислорода. При протекании заряда происходит генерация вакансий кислорода, что увеличивает токи утечки. Оценены параметры ловушек: термическая энергия ловушки  $W_t=1,6$  эВ, оптическая энергия ловушки  $W_{\text{opt}}=3,2$  эВ, эффективная масса электрона  $m^*=0,5$   $m_e$ . Длительный отжиг при температуре 250°C приводит к рекомбинации вакансий кислорода с междоузельным кислородом и уменьшению токов утечки до начального уровня.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Brown D., Brewer J.F.** Nonvolatile Semiconductor Memory Technology. A Comprehensive Guide to Understanding and Using NVSM Devices. New York: IEEE Press, 1998.
2. **Гриценко В.А.** Флэш приборы памяти // Диэлектрики в Наноэлектронике. – Новосибирск: СО РАН, 2010. 258 с.
3. **Fowler R.H., Nordheim L.** Electron emission in intense electric fields // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1928, Vol. 119, No. 781. P. 173-181.
4. **Blöchl P. E., Stathis J. H.** Hydrogen electrochemistry and stress-induced leakage current in silica // Physical Review Letters, 1999, Vol. 83. P. 372-375.
5. **Endoh T., Chiba T., Sakuraba H. et al.** A quantitative analysis of stress-induced leakage currents and extraction of trap properties in 6.8 nm ultrathin silicon dioxide films // Journal of Applied Physics, 1999, Vol. 86. P. 2095-2099.
6. **Jiménez-Molinós F., Palma A., Gámiz F. et al.** Physical model for trap-assisted inelastic tunneling in metal-oxide-semiconductor structures // Journal of Applied Physics, 2001, Vol. 90. P. 3396-3404.
7. **Komiya K., Omura Y.** Spectroscopic characterization of stress-induced leakage current in sub 5-nm-thick silicon oxide film // Journal of Applied Physics, 2002, Vol. 92. P. 2593-2601.
8. **Sze S.M., Ng K.K.** Physics of Semiconductor Devices. – 3rd edition. New York: Wiley, 2006. 832 p.
9. **Насыров К.А., Гриценко В.А.** Механизмы переноса электронов и дырок в диэлектрических пленках // Успехи физических наук, 2013, Т. 183, № 10. С. 1099-1114.
10. **Гриценко В.А.** Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах. – Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993. 280 с.

11. **Weinberg Z.A.** On tunneling in metal-oxide-silicon structures // *Journal of Applied Physics*, 1982, Vol. 53. P. 5052-5056.
12. **Nasyrov K.A., Shaimeev S.S., Gritsenko V.A., Хан J.Н.** Phonon-coupled trap-assisted charge injection in metal-nitride-oxide-silicon/silicon-oxidenitride-oxide-silicon structures // *Journal of Applied Physics*, 2009, Vol. 105, Iss. 12. P. 123709.
13. **Френкель Я.И.** К теории электрического пробоя в диэлектриках и электронных полупроводниках // *ЖТФ*, 1938, Т. 8. С. 1292-1301. См. также: [Frenkel J. On the theory of electric breakdown of dielectrics and electronic semiconductors // *Technical Physics of the USSR*, 1938, Vol. 5. P. 685-695].
14. **Frenkel J.** On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semi-conductors // *Physical Review*, 1938, Vol. 54. P. 647-648.
15. **Hill R.M.** Poole-Frenkel conduction in amorphous solids // *Philosophical Magazine*, 1971, Vol. 23. P. 59-86.
16. **Makram-Ebeid S., Lannoo M.** Quantum model for phonon-assisted tunnel ionization of deep levels in a semiconductor // *Physical Review B*, 1982, Vol. 25. P. 6406-6424.
17. **Nasyrov K.A., Gritsenko V.A.** Charge transport in dielectrics via tunneling between traps // *Journal of Applied Physics*, 2011, Vol. 109. P. 093705.
18. **Насыров К.А., Гриценко В.А.** Перенос заряда в диэлектриках туннелированием между ловушками // *ЖЭТФ*, 2011, Т. 139. С. 1172-1181. См. также: [Nasyrov K. A., Gritsenko V. A. Charge transport in dielectrics by tunneling between traps // *JETP*, 2011, Vol. 112. P. 1026-1034].
19. **Buchanan D.A., Fischetti M.V., DiMaria D.J.** Coulombic and neutral trapping centers in silicon dioxide // *Physical Review B*, 1991, Vol. 43. P. 1471-1486.
20. **Gritsenko V., Wong H.** Atomic and electronic structures of traps in silicon oxide and silicon oxynitride // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2011, Vol. 36, No. 3. P. 129-147.
21. **O'Reilly E.P., Robertson J.** Theory of defects in vitreous silicon dioxide // *Physical Review B*, 1983, Vol. 27. P. 3780-3795.
22. **Pacchioni G., Ieranò G.** Computed optical absorption and photoluminescence spectra of neutral oxygen vacancies in  $\alpha$ -quartz // *Physical Review Letters*, 1997, Vol. 79. P. 753-756.
23. **Tohmon R., Mizuno H., Ohki Y. et al.** Correlation of the 5.0 - and 7.6-eV absorption bands in  $\text{SiO}_2$  with oxygen vacancy // *Physical Review B*, 1989, Vol. 39. P. 1337-1345.
24. **Afnas'ev V.V., Stesmans A.** Interfacial defects in  $\text{SiO}_2$  revealed by photon stimulated tunneling of electrons // *Physical Review Letters*, 1997, Vol. 78. P. 2437-2440.
25. **Uchino T., Takahashi M., Yoko T.** Mechanism of interconversion among radiation-induced defects in amorphous silicon dioxide // *Physical Review Letters*, 2001, Vol. 86. P. 1777-1780.
26. **ElSayed Al-M., Wimmer Y., Goes W. et al.** Theoretical models of hydrogen-induced defects in amorphous silicon dioxide // *Physical Review B*, 2015, Vol. 92. P. 014107.
27. **Yamabe K., Miura Y.** Discharge of trapped electrons from MOS structures // *Journal of Applied Physics*, 1980, Vol. 51, Iss. 12. P. 6258-6264.
28. **Novikov N., Gritsenko V.A., Nasyrov K.A.** Charge transport mechanism in amorphous alumina // *Applied Physics Letters*, 2009, Vol. 94, Iss. 22. P. 222904.
29. **Perevalov T.V., Tereshenko O.E., Gritsenko V.A. et al.** Oxygen deficiency defects in amorphous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  // *Journal of Applied Physics*, 2010, Vol. 108, Iss. 1. P. 013501.
30. **Perevalov T.V., Aliev V.Sh., Gritsenko V.A. et al.** The origin of 2.7 eV luminescence and 5.2 eV excitation band in hafnium oxide // *Applied Physics Letters*, 2014, Vol. 104, Iss. 7. P. 071904.
31. **Islamov D.R., Gritsenko V.A., Cheng C.H., Chin A.** Origin of traps and charge transport mechanism in hafnia // *Applied Physics Letters*, 2014, Vol. 105, Iss. 22. P. 222901.
32. **Orlov O.M., Krasnikov G.Ya., Gritsenko V.A. et al.** Nanoscale potential fluctuation in non-stoichiometric hafnium suboxides // *ECS Transactions*, 2015. Vol. 69. Iss. 5. P. 237-241.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ FRAM И RERAM, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

► О.М.Орлов<sup>1,3</sup>, А.М.Маркеев<sup>2</sup>, А.В.Зенкевич<sup>2</sup>, К.В.Егоров<sup>2</sup>, А.Г.Черникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО "НИИМЭ и Микрон", <sup>2</sup>МФТИ (ГУ), <sup>3</sup>АО "НИИМЭ"

В работе представлены результаты исследований структурных и электрических свойств материалов на основе оксида гафния, выращенных методом АСО, показана возможность и перспективы использования их наноразмерных слоев в элементах энергонезависимой памяти типа FRAM и ReRAM.

## RESEARCH FEATURES OF FRAM AND RERAM NON-VOLATILE MEMORY DEVICES BASED ON ALD PROCESSES

O.M.Orlov<sup>1,3</sup>, A.M.Markeev<sup>2</sup>, A.V.Zenkevich<sup>2</sup>, K.V.Egorov<sup>2</sup>, A.G.Chernikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC MERI, <sup>2</sup>MFTI (SU), <sup>3</sup>Mikron JSC

Research results of structural and electrical properties of the materials based on ALD HfO<sub>2</sub> were investigated. The possibility and application perspectives of nanoscale layers for FRAM and ReRAM non-volatile memory was demonstrated.

Исследования и разработки в области создания элементов энергонезависимой памяти на новых физических принципах являются актуальной и востребованной в настоящее время задачей. Среди этих элементов в первую очередь можно выделить следующие два вида памяти: память на основе резистивного переключения (resistive random access memory, ReRAM) и память на основе сегнетоэлектричества (ferroelectric random access memory, FRAM). Каждый из перечисленных видов памяти имеет свои преимущества и проблемы в части реализации ее массового производства, при этом важным аспектом является исследование возможности встраивания ячеек памяти в КМОП технологический маршрут на этапе многослойной разводки. Актуальным является также возможность трехмерной реализации данных ЯЭП [1, 2].

Целью данной работы стало исследование перспектив создания элементов памяти типа FRAM и ReRAM на основе структур, полученных

с использованием процессов атомно-слоевого осаждения (АСО). Основным материалом для исследования в области ReRAM был выбран оксид гафния как материал, проявляющий свойства, необходимые для создания элементов памяти. В случае формирования сегнетоэлектрических структур исследовался твердый раствор Hf<sub>0,5</sub>Zr<sub>0,5</sub>O<sub>2</sub>. Актуальность исследования последнего связана с обнаружением сегнетоэлектричества в тонких пленках оксида гафния, выращенного методом АСО и легированного различными элементами (Al, Zr, Y, Gd, Si, La) [3–6]. Исследование данных материалов представляет большой практический интерес в связи с тем, что они способны заменить традиционные перовскиты (PZT, SBT) для создания FRAM. Что касается разработки элементов памяти ReRAM, эффект резистивного переключения в структурах на основе оксидов переходных металлов известен довольно давно (см. [7]), однако до сих пор нет четкого представления о физическом механизме

переключения. В последние годы устройства ReRAM активно движутся к созданию коммерческого продукта [8-10]. Также было показано, что использование метода АСО для формирования ReRAM-стэков дает ряд преимуществ над другими методами осаждения, поэтому актуально дальнейшее исследование именно в этой области.

К настоящему времени на осаждение оксида гафния, в том числе легированный такими примесями, как Si, Al, Y, Zr, разработаны процессы получения методом АСО. Метод АСО, использующий самонасыщаемые химические реакции газообразных реагентов с поверхностными активными центрами, уже зарекомендовал себя как способ высоко-контролируемого формирования наноразмерных слоев с беспрецедентной однородностью, в том числе и на структурах с развитым рельефом. Именно благодаря применению метода АСО для high-k-диэлектриков, был достигнут существенный прорыв в производстве логических КМОП-устройств вплоть до уровня 22 нм, стало возможным производство DRAM-памяти с 3D-конденсаторами повышенной емкости по технологии 25 нм, начинается производство 3D-флешпамяти. По мнению ведущих экспертов, учитывая то, что микроэлектроника становится все более и более трехмерной и в связи с необходимостью высокой конформности покрытия 3D-структур, АСО, по-видимому, станет основным методом получения критически важных функциональных слоев в полупроводниковой промышленности.

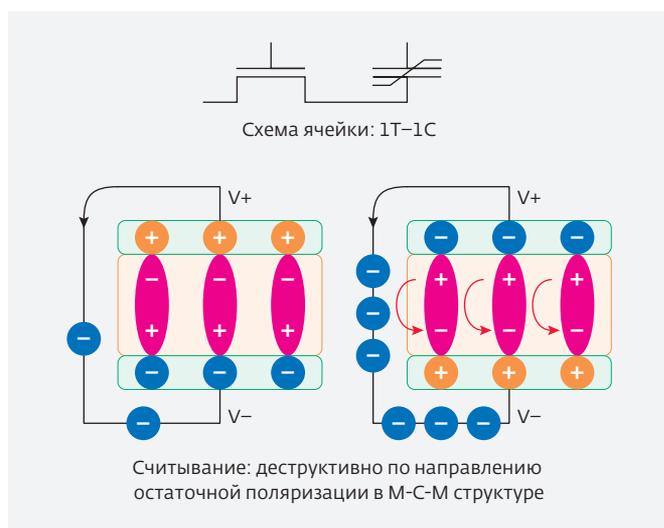


Рис.1. Принцип действия ячейки FRAM-памяти

## ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ FRAM И ReRAM ЭЛЕМЕНТОВ ПАМЯТИ

В устройствах ReRAM энергонезависимость достигается за счет хранения двух поляризованных состояний материалом сегнетоэлектрического конденсатора. Чтение ячейки, хранящей логический "0" или "1", происходит следующим образом. Ячейка записывается в состояние "0", при этом если в ячейке ранее был записан "0", то будет зарегистрирован лишь небольшой ток линейной емкостной зарядки. Если же была записана "1", то будет зарегистрирован импульс тока переполаризации. Таким образом, чтение ячейки является деструктивным. Из-за этого "деструктивного чтения" трудно найти сегнетоэлектрические материалы и материалы электродов, которые обеспечивали бы как высокое значение остаточной поляризации, так и необходимую стабильность в течение длительных рабочих циклов.

Наиболее существенной особенностью FRAM является ее значительно более низкое энергопотребление, по сравнению с любым другим типом энергонезависимой памяти (включая флеш-память). В дополнение, низкое напряжение работы (менее 2 В) является преимуществом над флеш-памятью, которая требует более 20 В как для операций записи, так и стирания. Кроме того, скорость записи и максимальное количество циклов перезаписи ReRAM соответственно на два и шесть порядков больше, чем у флеш-памяти.

Наиболее быстро развивающейся концепцией резистивной памяти на биполярном переключении являются биполярные ReRAM на основе тонких пленок металлов (Metal oxide-bipolar filamentary – MO-BF). В таких устройствах переключение происходит за счет перестройки анионов. Структура ячеек MO-BF ReRAM является асимметричным стеклом электрод/изолятор/электрод. Один электрод служит для создания интерфейса, в котором

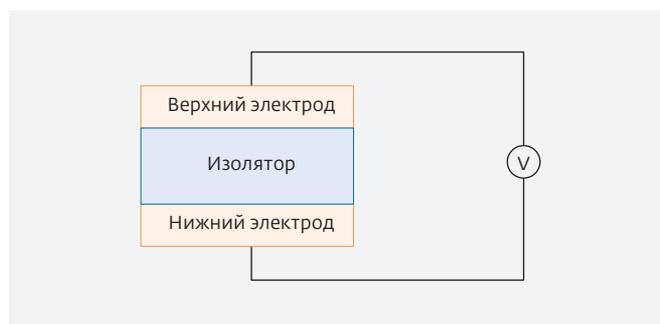


Рис.2. Структура элемента ReRAM-памяти

происходит переключение, его иногда называют активным электродом.

Другой электрод служит в качестве омического контакта и как резервуар для кислородных анионов в ходе переключения [11]. Наиболее распространенными металлическими оксидами, демонстрирующими переключение, являются  $TaO_x$  [12] и  $HfO_x$  [13] за счет их отличной производительности и CMOS совместимости. Также сообщалось о наличии биполярных переключений во многих оксидах переходных металлов, в том числе  $TiO_x$  [14],  $AlO_x$  [15],  $WO_x$  [16],  $SrTiO_x$  [17] и даже в некоторых оксинитридах металлов (например,  $AlO_xN_y$  [18]) и нитридах (например,  $AlN$  [19]). Помимо однослойных субстехиометрических оксидов, для создания ячеек MO-BF ReRAM также обычно используются двухслойные комбинации оксидов, где один слой оксида обладает составом, близким к стехиометрическому, в то время как второй слой оксида имеет в своем составе значительную концентрацию кислородных вакансий (например,  $Ta_2O_{5-x}/TaO_{2-x}$  [20]).

В биполярных ReRAM на основе тонких пленок оксидов металлов кислородные вакансии мигрируют в электрическом поле и формируют токопроводящий канал в изолирующем слое, таким образом ячейка переходит в состояние с низким сопротивлением. При приложении к ячейке поля в обратном направлении токопроводящий канал частично диссоциирует, что и является причиной увеличения сопротивления ячейки. Наилучшие рабочие характеристики ячеек ReRAM были получены при использовании в качестве диэлектрического слоя  $HfO_x$ ,  $TaO_x$ ,  $TiO_x$ . Сообщалось, что оксиды переходных металлов, такие как  $TiO_2$  [21],  $HfO_2$  [22], могут работать с биполярным и униполярным механизмом переключения.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

### Формирование элементов FRAM

Были созданы экспериментальные образцы структур металл-изолятор-металл (МИМ-структуры), в которых в качестве изолирующего слоя использовались слои многокомпонентного оксида  $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ . МИМ-структуры были сформированы на подложках кремний/оксид кремния (толщина ~100 нм), последний использовался в качестве изолирующего слоя при проведении электрофизических испытаний. В качестве нижнего электрода использовался нитрид титана толщиной ~19 нм, выращенный методом АСО. Осаждение  $TiN$  производилось из  $TiCl_4$  и  $NH_3$  при температуре 400°C. Продувка камеры осуществлялась азотом. Длительность

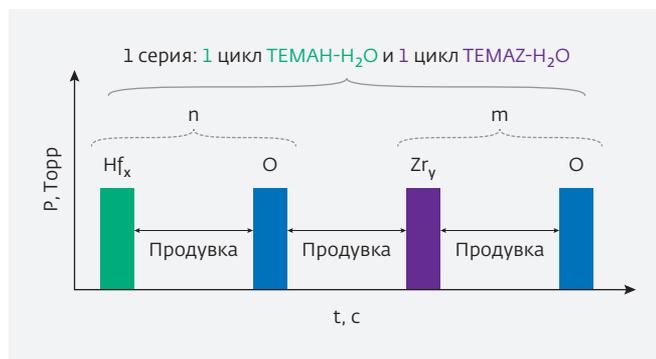


Рис.3. Схема формирования  $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$  методом АСО

импульса титанового прекурсора составляла 0,1 с, аммиака – 1,0 с. После каждого импульса титанового прекурсора реактор продувался в течение 6 с, а после импульса аммиака – 10 с.

Многокомпонентные оксиды  $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$  также были выращены с помощью метода АСО. В качестве газа-носителя и для продувки камеры использовался азот особой чистоты (99,999%). В качестве носителей гафния и циркония были использованы реагенты  $Hf[N(CH_3)(C_2H_5)_4]$  (ТЕМАН) и  $Zr[N(CH_3)(C_2H_5)_4]$  (ТЕМАЗ) соответственно, в качестве окислителя использовалась вода. Рост  $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$  производился при температуре реактора внутри так называемого окна АСО для используемых прекурсоров, а именно 240°C. Осаждение состояло из циклически повторяющихся этапов: напуск в камеру реагента ТЕМАН или ТЕМАЗ с помощью газа-носителя, продувка камеры азотом, напуск в камеру воды, продувка камеры азотом. Время напуска реагентов в течение одного реакционного цикла составляло 1,6, 1,6 и 0,1 с для ТЕМАН, ТЕМАЗ и  $H_2O$  соответственно. Продувка реакционной камеры азотом после каждого напуска реагента проводилась в течение 6 с. Температура источников ТЕМАН и ТЕМАЗ поддерживалась на уровне 100°C, температура деионизованной воды – комнатная. Повторение реакционных серий из 1 цикла ТЕМАН –  $H_2O$  и 1 цикла ТЕМАЗ –  $H_2O$  приводило к росту материала с заданным соотношением концентрации гафния и циркония 1:1. Схема эксперимента представлена на рис.3. Общее количество повторяемых серий выбиралось исходя из условия получения пленки определенной толщины. При этом использовались ранее полученные данные о скоростях роста бинарных оксидов гафния и циркония, согласно которым прирост составляет ~0.82 Å/цикл.

Далее на часть образцов было произведено осаждение сплошного электрода с последующим отжигом всей структуры. В качестве верхнего электрода в данной части исследования использовалась платина, получаемая методом электронно-лучевого испарения. Толщина слоя составляла ~30 нм. Отжиг производился в атмосфере азота (чистота 99,999%) при 400°C в течение 30 с. Другая часть образцов подвергалась отжигу до нанесения верхнего электрода (тип и толщина электрода такие же). В этом случае параметры отжига были те же, что и при отжиге с верхним электродом.

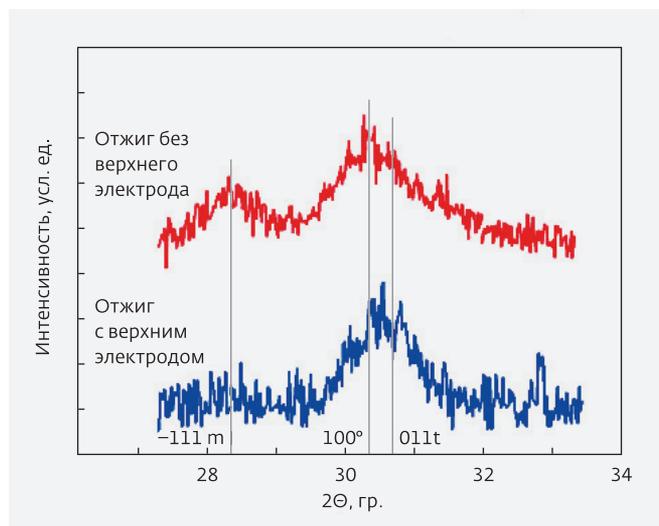
Отдельно следует сказать про структуры, выращенные полностью методом АСО. В таких структурах роль верхнего электрода также выполнял нитрид титана толщиной 19 нм. Параметры осаждения те же, что и для нижнего электрода. Важно отметить, что температура осаждения TiN совпадает с необходимой температурой отжига сегнетоэлектрического слоя, вследствие чего нет необходимости подвергать всю структуру дополнительному отжигу после осаждения верхнего электрода.

### Формирование элементов ReRAM

Были созданы экспериментальные образцы МИМ-структур, в которых в качестве изолирующего слоя использовались пленки HfO<sub>2</sub> и Hf<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> (в этом случае состав пленки изменяется по толщине). МИМ-структуры были сформированы на подложках кремний/оксид кремния (толщина ~100 нм), последний использовался в качестве изолирующего слоя при проведении электрофизических испытаний. В качестве нижнего электрода использовалась платина толщиной ~70 нм, выращенная методом электронно-лучевого испарения. Далее осаждался слой изолятора: для одних структур проводилось АСО HfO<sub>2</sub> в цикле Hf[N(CH<sub>3</sub>)(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>]-H<sub>2</sub>O при 240°C, для других структур проводилось АСО пленки



**Рис.4.** Схематичное изображение рецепта роста пленки Hf<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> с градиентным распределением алюминия по глубине



**Рис.5.** Рентгеновские дифрактограммы образцов (толщина сегнетоэлектрического слоя ~10 нм), отожженных в течение 30 с в присутствии верхнего электрода из пластины и без него

Hf<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> с переменным по толщине составом при температуре подложки 240°C методом проведения реакционных серий из n циклов Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O и k циклов Hf[N(CH<sub>3</sub>)(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>]-H<sub>2</sub>O в последовательности, показанной на рис.4. В качестве верхнего электрода использовался нитрид титана толщиной ~70 нм, выращенный методом магнетронного распыления.

Вопрос создания выращенных полностью АСО МИМ структур рассматривался отдельно. В этом случае в качестве нижнего и верхнего электродов должен выступать нитрид титана, а в роли диэлектрика выступает пленка HfO<sub>2</sub>. Данные материалы имеют хорошую совместимость с существующими КМОП-процессами и возможность исследования таких структур представляется крайне перспективной.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Исследование образцов FRAM

Полученные образцы с различными временами отжига со сплошным верхним электродом и без электрода исследовались методом рентгеновской дифракции в геометрии скользящего пучка. Рентгеновские дифрактограммы от образцов, отожженных без электрода и в присутствии верхнего электрода в течение 30 с представлены на рис.5 на примере пленок толщиной 10 нм. Видно, что в результате отжига происходит кристаллизация исследуемых слоев, причем образуется смесь трех

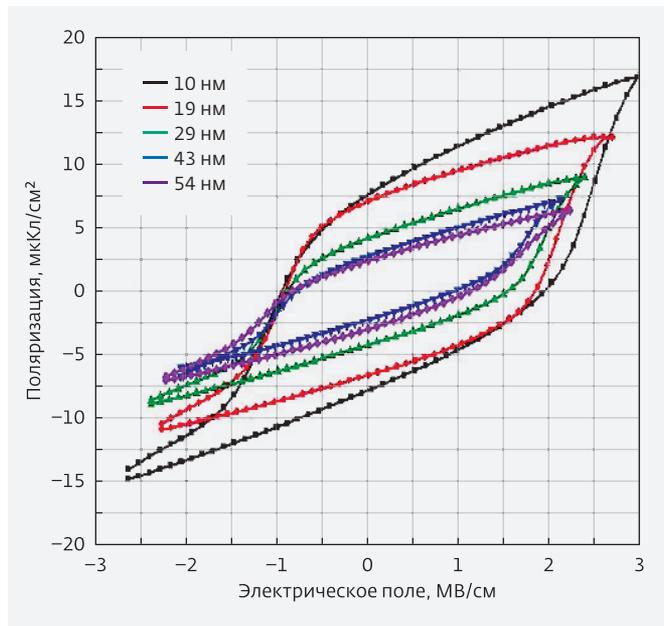


Рис.6. PV гистерезис для полностью ALD-структур с различными толщинами  $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$

кристаллических фаз: тетрагональной, орторомбической и моноклинной, при этом отжиг в присутствии верхнего электрода вызывает уменьшение относительного содержания моноклинной фазы, а, следовательно, увеличение содержания орторомбической фазы, ответственной за явление сегнетоэлектричества, что должно положительно сказываться на величине остаточной поляризации.

Затем образцы, прошедшие отжиг с верхним платиновым электродом и без него, исследовались электрофизически для измерения петель PV гистерезиса. Было показано, что как в случае отжига с верхним платиновым электродом, так и при отжиге без верхнего электрода структуры демонстрируют нелинейную зависимость поляризации от напряжения (петля гистерезиса), что говорит о проявлении сегнетоэлектрических свойств (на рис.6 представлен результат измерения петель гистерезиса для структур с различной толщиной сегнетоэлектрического слоя, прошедших отжиг в присутствии верхнего электрода, а на рис.7 – зависимости величин остаточной поляризации и относительного содержания моноклинной фазы от толщины пленки для обоих случаев). Видно, что относительное содержание моноклинной фазы существенно выше в случае отжига без верхнего электрода, и, соответственно, ниже остаточная поляризация. Величина остаточной поляризации для образцов с толщиной сегнетоэлектрического

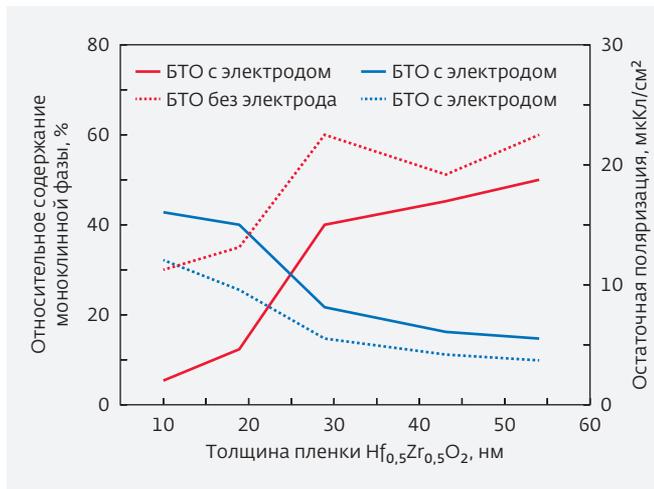


Рис.7. Зависимости величины остаточной поляризации и относительного содержания моноклинной фазы от толщины для структур, отожженных как в присутствии верхних электродов, так и без них

слоя 10 нм составила  $\sim 15$  мкКл/см<sup>2</sup> и  $\sim 9$  мкКл/см<sup>2</sup> в случае отжига с верхним электродом и без него соответственно. Это важный результат, так как ранее предполагалось, что отжиг без верхнего электрода не приводит к стабилизации сегнетоэлектрической фазы.

Также были электрофизически исследованы структуры, выращенные полностью АСО. Структуры с толщиной СЭ слоя  $\sim 10$  нм продемонстрировали остаточную поляризацию на уровне  $\sim 10$  мкКл/см<sup>2</sup> и более  $10^7$  циклов переключения состояния без деградации свойств.

### Исследование образцов ReRAM

Для созданных структур были исследованы их электрофизические параметры на основе измерения и анализа ВАХ этих структур. Типовая ВАХ показана на рис.8, из которого видно, что напряжение, при котором ячейка переходит из высокоомного состояния в низкоомное и наоборот, составляет менее 1 В, что говорит о высокой энергетической эффективности таких ячеек. Был произведен эксперимент по циклированию ячеек ReRAM памяти. Он заключался в последовательной перезаписи ячейки, при которой измеряется сопротивление высокоомного и низкоомного состояний. Подобная перезапись ячейки проводилась несколько тысяч раз. На рис.9 показана динамика сопротивлений высокоомного и низкоомного состояний в зависимости от числа циклов перезаписи ячейки. Можно сделать вывод о том, что функциональный слой,

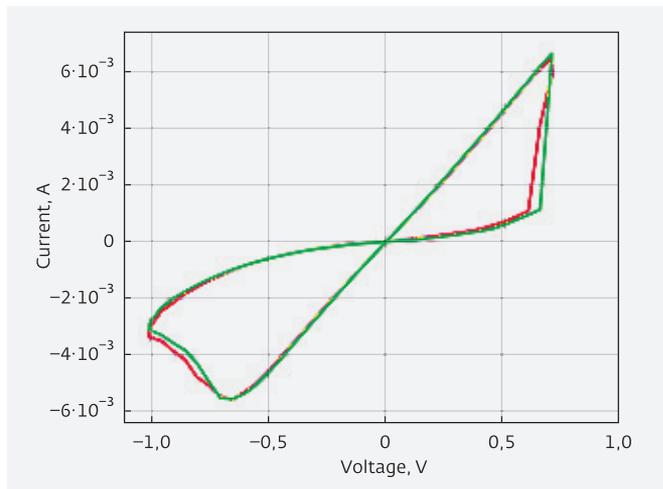


Рис.8. ВАХ ячейки памяти с резистивным переключением на основе  $\text{HfO}_2$

выполненный с добавлением градиента алюминия в слой оксида гафния, показывает более стабильные характеристики сопротивления от числа циклов перезаписи (меньший разброс сопротивлений). С увеличением числа циклов сопротивление остается довольно стабильным вплоть до  $10^6$  циклов перезаписи. Это позволяет сделать вывод о возможности использования подобных ячеек в качестве основы для схем памяти на новых физических принципах. Также стоит отметить, что в ячейках с  $\text{Hf}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_2$  отношение сопротивлений

высокоомного состояния к низкоомному составляет более низкое значение (~5), чем для ячеек с функциональным слоем на основе  $\text{HfO}_2$  (~10), однако величина этого отношения все же является достаточной для дальнейшего построения схем считывания и управления подобными структурами.

### Новизна результатов

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результат:

- продемонстрирована стабилизация сегнетоэлектрических свойств для элементов FRAM в случае отжига без верхнего электрода;
- показана принципиальная возможность создания структур для ReRAM и FRAM применений, выращенных полностью методом ACO. Данные результаты важны в первую очередь для обсуждения возможности 3D-интеграции этих элементов памяти.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и измерения позволяют сделать следующие выводы: продемонстрирована возможность создания ячеек памяти типа FRAM и ReRAM на базе оборудования предприятия ОАО "НИИМЭ и Микрон", а также научного оборудования ЦКП МФТИ; интеграция технологии создания таких ячеек в традиционные КМОП-процессы является перспективной задачей. В настоящее время ведутся работы в этом направлении. Проведенные

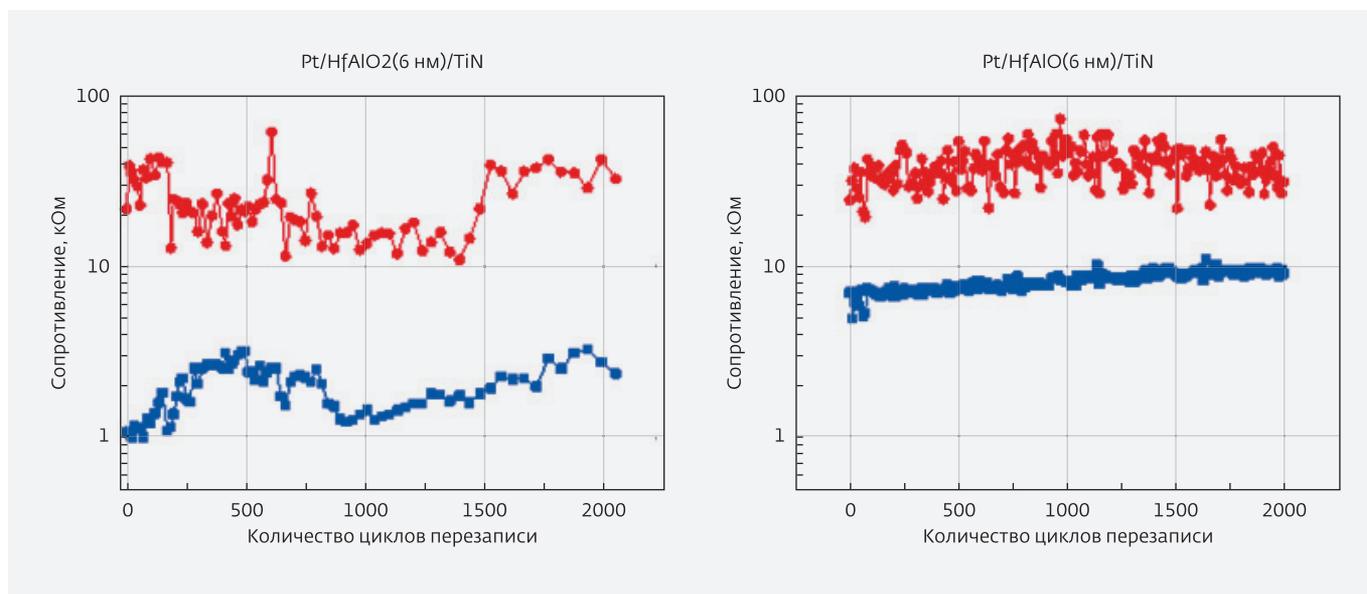


Рис.9. Состояния с высоким и низким сопротивлением в ходе циклирования ячеек: слева – в качестве функционального слоя выступает  $\text{HfO}_2$ , справа –  $\text{Hf}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_2$

исследования являются частью обширных научных изысканий в области новых типов памяти и в будущем лягут в основу развития данной отрасли в Российской Федерации.

*Данная работа осуществляется при поддержке министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы "Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы"; шифр работы 2014-14-576-0140-008, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57614X0065.*

## ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красников Г.Я., Орлов О.М.** Отличительные особенности и проблемы КМОП технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 7–8. С. 124–128.
2. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011.
3. **Mueller S., Mueller J., Singh A., Riedel S., Sundqvist J. et al.**, Adv. Funct. Mater. 22 (2012) 2412–2417.
4. **Muller J., Boscke T.S., Brauhaus D., Schroder U., Bottger U. et al.** Appl. Phys. Lett. 99 (2011) 112901.
5. **Muller J., Schrder U., Boscke T.S., Muller I., Bottger U. et al.** J. Appl. Phys. 110 (2013) 114113.
6. **Muller J., Polakowski P., Mueller S., Mikolajick T.** ECS Trans. 64 (8) (2014) 159–168.
7. **Bruyere J.C., Chakraverty B.K.** Appl. Phys. Lett. 16, 40 (1970).
8. **Kawahara A. et al.** An 8Mb multi-layered cross-point ReRAM macro with 443MB/s write throughput, in ISSCC Tech. Dig., 2012, pp. 432–434.
9. **Tz-Yi L. et al.** A 130.7mm<sup>2</sup>-layer 32Gb ReRAM memory device in 24nm technology, in ISSCC Dig. of Tech. Papers, 2013, pp. 210–211.
10. Panasonic Starts World's First Mass Production of ReRAM Mounted Microcomputers. Available: <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2013/07/en130730-2/en130730-2.html>.
11. **Waser R., Bruchhaus R. and Menzel S.** Redox-based resistive switching memories, in Nanoelectronics and Information Technology, R. Waser, Ed., ed Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013.
12. **Wei Z. et al.** Highly reliable TaOx ReRAM and direct evidence of redox reaction mechanism, in IEDM, 2008, pp. 1–4.
13. **Lee H.Y. et al.** Low power and high speed bipolar switching with a thin reactive Ti buffer layer in robust HfO<sub>2</sub> based RRAM, in IEDM Tech. Dig., 2008, pp. 1–4.
14. **Yang J.J. et al.** High switching endurance in TaOx memristive devices, Applied Physics Letters, vol. 97, p. 232102, Dec. 2010.
15. **Wanki K. et al.** Forming-free nitrogen-doped AlOx RRAM with sub- $\mu$ A programming current, in VLSI Technology, 2011, pp. 22–23.
16. **Chien W.C. et al.** A forming-free WOx resistive memory using a novel self-aligned field enhancement feature with excellent reliability and scalability, in IEDM Tech. Dig., 2010, pp. 19.2.1–19.2.4.
17. **Menzel S. et al.** Origin of the Ultra-nonlinear Switching Kinetics in Oxide-Based Resistive Switches, Advanced Functional Materials, vol. 21, pp. 4487–4492, Dec. 2011.
18. **Marinella M.J., Stevens J.E., Longoria E.M. and Kotula P.G.** Resistive switching in aluminum nitride, in Device Research Conference (DRC), 2012 70th Annual, 2012, pp. 89–90.
19. **Choi B. et al.** Nitride memristors, Applied Physics A, vol. 109, pp. 1–4, Oct. 2012.
20. **Lee M.-J. et al.** A fast, high-endurance and scalable non-volatile memory device made from asymmetric Ta<sub>2</sub>O<sub>5-x</sub>/TaO<sub>2-x</sub> bilayer structures, Nat Mater, vol. 10, pp. 625–630, Aug. 2011.
21. **Jeong D.S., Schroeder H. and Waser R.** Coexistence of bipolar and unipolar resistive switching behaviors, Electrochem. Solid-State Lett., vol. 10, pp. G51–G53, 2007.
22. **Goux L., Chen Y.-Y., Pantisano L., Wang X.-P., Groeseneken G., Jurczak M. and Wouters D.J.** On the Gradual Unipolar and Bipolar Resistive Switching of TiN/HfO<sub>2</sub>/Pt Memory Systems, Electrochemical and Solid-State Letters, vol. 13, pp. G54–G56, 2010.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЯЧЕЙКЕ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ

► П.С.Захаров, А.Г.Итальянцев  
АО "НИИМЭ"

Построена математическая модель элемента резистивной памяти на основе диоксида кремния, позволяющая численно решить уравнение теплопроводности по неявной локально-одномерной схеме. Показано, что решение слабо зависит от параметров модели и численной схемы. Результаты моделирования, а именно площадь сечения канала проводимости и время перехода в стационарное состояние согласуются с экспериментальными результатами других авторов.

## TEMPERATURE CALCULATION FOR SILICA-BASED RESISTIVE MEMORY DEVICES

P.S.Zakharov, A.G.Italyantsev

JSC MERI

A mathematical model intended for numerical calculation of heat equation for silica-based resistive memory device has been made. The model uses implicit locally one-dimensional scheme. It has been shown that the numerical solution of the equation has weak dependence on model parameters and numerical scheme parameters. The modelling results such as filament cross section and time required to establish a stationary state are in a good agreement with experimental data.

## ВВЕДЕНИЕ

Резистивная память на основе оксида кремния (ReRAM  $\text{SiO}_x$ , где  $x \leq 2$ ) – разновидность энерго-независимых запоминающих устройств, которая все больше и больше привлекает внимание исследователей и разработчиков в области микро- и нанoeлектроники. К ее достоинствам относятся, во-первых, простая конструкция – плоская конденсаторная структура. Во-вторых, широкое "окно" памяти, то есть большое отношение электрических проводимостей в различных логических состояниях. В-третьих, высокое быстродействие. Наконец, с точки зрения специального применения важно то, что структуры ReRAM  $\text{SiO}_x$  по своей радиационной стойкости существенно превосходят флеш-память [1].

В основе работы ReRAM  $\text{SiO}_x$  лежит эффект обратимого переключения электрической проводимости оксида кремния под действием электрического

поля. Активное изучение данного явления началось в 2008 году [2]. Экспериментальные результаты указывают на то, что переход в низкоомное состояние связан с образованием локальных проводящих каналов, а переход в высокоомное – с их локальным разрушением.

Тем не менее, до сих пор ведутся дискуссии о механизмах переключения проводимости оксида кремния. Обобщая результаты других авторов [1, 3, 4], можно сказать, что образование проводящего канала сопровождается разрывом связей Si-O под действием электрического поля, а разрушение – их восстановлением вследствие джоулева тепла.

Очевидно, что тепло играет важную роль в эффекте переключения проводимости. Однако оценки температуры в ячейке ReRAM  $\text{SiO}_x$  до сих пор никем не были проведены. Цель настоящей работы – расчет температуры в конденсаторной структуре резистивной памяти на основе оксида

кремния с помощью численного решения уравнения теплопроводности.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

"Островковые" тестовые структуры ReRAM  $\text{SiO}_x$  изготовлены на кремниевой подложке  $n^+$ -типа проводимости (вставка на рис.1).

Активный слой толщиной 40 нм формировался термическим окислением кремния [5]. После чего из газовой фазы осаждался слой поликремния толщиной 400 нм. Открытая торцевая поверхность активного слоя получена жидкостным травлением. Топологический размер "островка" составил примерно  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>.

Эффект обратимого переключения электрической проводимости наблюдался после вакуумирования и электроформовки тестовой структуры. В качестве вакуумной камеры использовался электронный микроскоп FEI Quanta 200 3D. Давление остаточных газов было порядка  $10^{-5}$  мм рт. ст. Электроформовка проводилась при напряжении примерно 20 В.

ВАХ структуры после электроформовки (см. рис.1) хорошо согласуется с результатами других авторов [1]. Переключение в низкоомное состояние происходит при напряжениях 3,5–5,3 В, переключение в высокоомное – при напряжениях свыше 5,3 В.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Расчет температуры проводится в конденсаторной структуре, имеющей форму куба (рис.2). Активный слой ( $\text{SiO}_x$ ) толщиной 40 нм заключен между двумя

кремниевыми электродами, расположенными сверху и снизу.

Структура, будучи в низкоомном состоянии, имеет единственный локальный канал. Такое допущение основано на следующих фактах. Во-первых, переключение в высокоомное состояние сопровождается резким падением проводимости (см. рис.1). Во-вторых, проводимость структуры в низкоомном состоянии не зависит от ее топологических размеров [1]. В работе [2] было показано, что такой канал расположен вблизи открытой торцевой поверхности активного слоя.

Второе допущение, на котором построена настоящая математическая модель, состоит в том, что свойства проводящего канала совпадают со свойствами объемного кремния. Такое приближение, хотя довольно грубо, все же небезосновательно. Авторы [1, 6] наблюдали в активном слое Si-нанокристаллиты размером примерно 5 нм.

Численное решение трехмерного уравнения теплопроводности проходило по неявной локально-одномерной схеме [7]. Начальное условие – температура ( $T$ ) в тестовой структуре всюду равна 300 К. На боковых сторонах куба задавались граничные условия второго рода. На верхней и нижней стороне – граничные условия первого рода ( $T=300$  К). Источником тепла является проводящий канал. Расчет температуры ведется для случая, когда через структуру протекает ток, максимально возможный в низкоомном состоянии (точка "R" на рис.1). Таким образом моделируется ситуация непосредственно перед переключением в высокоомное состояние.

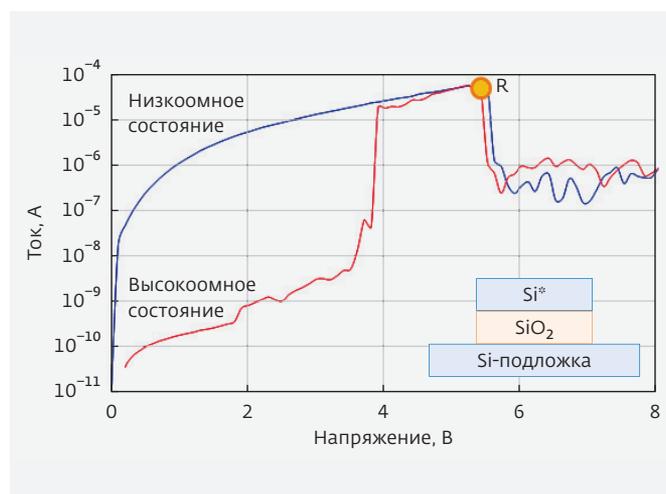


Рис.1. Тестовая структура и ее ВАХ после электроформовки

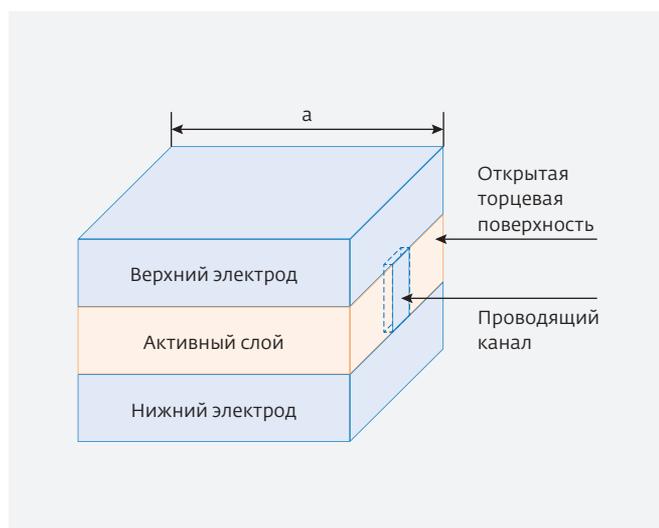
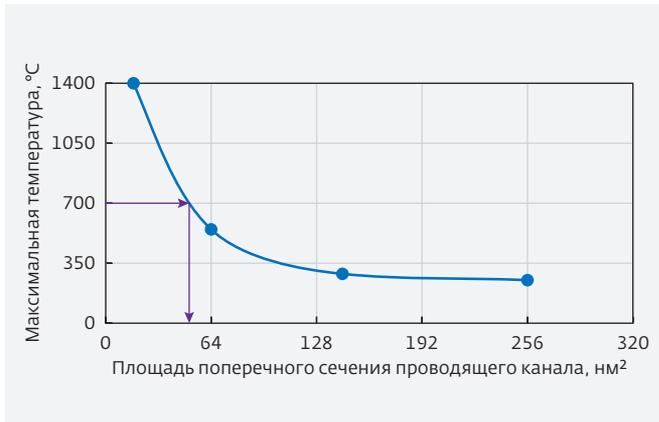


Рис.2. Моделируемая структура ReRAM  $\text{SiO}_x$



**Рис.3.** Зависимость максимальной температуры от площади поперечного сечения проводящего канала

Дополнительно рассмотрена задача, в которой с открытой торцевой поверхности структуры происходит излучение.

Алгоритм решения реализован в программном коде среды MatLab®.

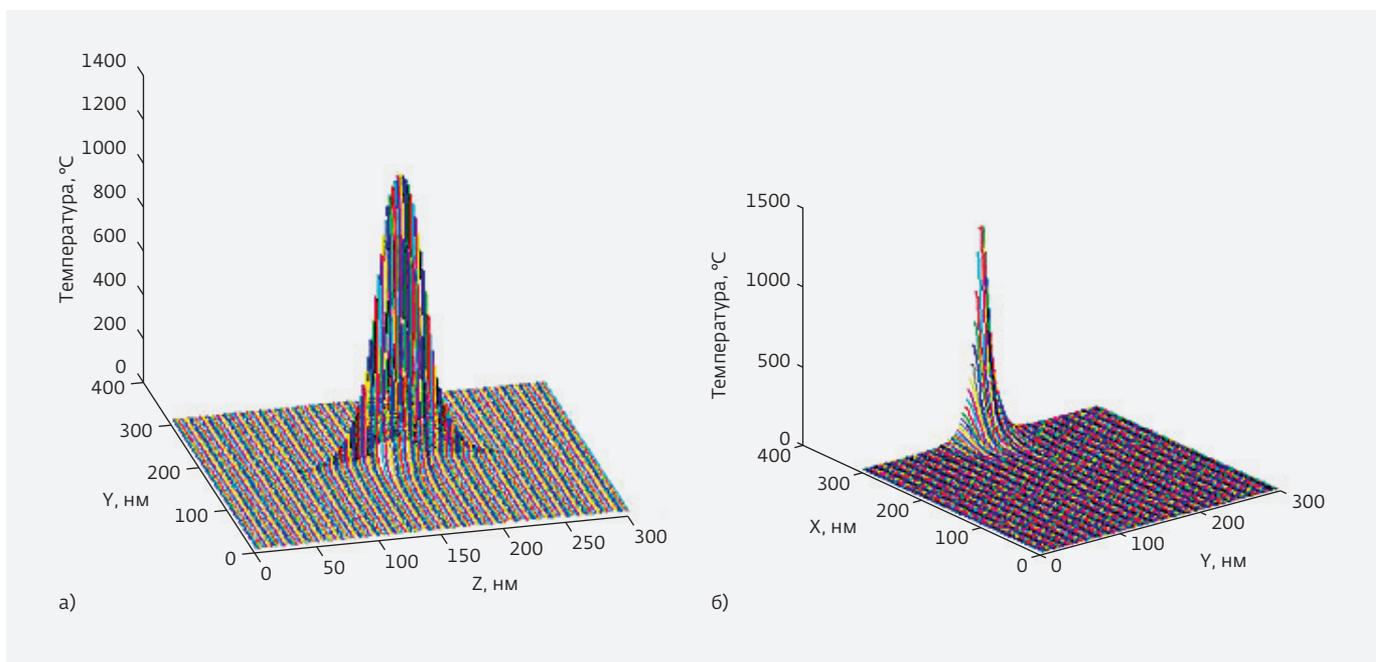
### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Решения уравнения теплопроводности имеют устойчивый характер. Это подтверждается тем, что вариации размеров куба (а), шаг пространственной

( $\Delta h$ ) и временной ( $\Delta t$ ) сетки не приводят к существенному изменению решения. Примем за "базовые" следующие параметры модели: шаг пространственной сетки по каждой координате  $\Delta h_0=2$  нм; шаг временной сетки  $\Delta t_0=2$  пс; размер куба  $a_0=100$  нм. Тогда сгущение пространственной сетки в 64 раза отклонит решение от "базового" не более, чем на 14%. При сгущении временной сетки в три раза отклонение не превысит 11%. Увеличение объема куба в 27 раз даст отклонение не более 30%.

Расчеты выполнены для структур, в которых площадь поперечного сечения проводящего канала (S) находится в диапазоне 16-256 нм<sup>2</sup>. Зависимость максимальной температуры в структуре ( $T_{max}$ ) от S дана на рис.3. Во всех случаях температура в структуре выходит на свой максимум за время порядка 0,5 нс. Распределение T в плоскости, параллельной электродам и равноудаленной от них, а также в плоскости открытой торцевой поверхности представлено на рис.4. Как и следовало ожидать, температура достигает своего наибольшего значения в проводящем канале, в точке равноудаленной от электродов.

Корректность построенной модели подтверждается анализом проведенных расчетов. Действительно, согласно работе [1], отжиг ячейки ReRAM SiO<sub>x</sub> при температуре 700°C в течение 10 мин



**Рис.4.** Профили распределения температуры в плоскости открытой торцевой поверхности (слева) и в плоскости параллельной и равноудаленной от электродов (справа); сечение проводящего канала 4 × 4 нм<sup>2</sup>

не приводит к деградации ее низкоомного состояния. Отсюда следует, что в момент перед разрушением канала температура в нем достигает существенно больших значений. Полученная нами зависимость  $T_{\max} = T_{\max}(S)$  (см. рис.3) показывает, что условие  $T_{\max} > 700$  °C выполняется только в том случае, если  $S$  не превышает  $7 \times 7$  нм<sup>2</sup>. Напомним, что в работе [1] наблюдались Si-нанокристаллиты размером примерно 5 нм.

Вторым признаком корректности модели является тот факт, что температура в структуре стабилизируется за время порядка 0,5 нс. В работе [8] сообщается, что переключение ячейки ReRAM SiO<sub>x</sub> в высокоомное состояние происходит за время не более 50 нс.

Важно отметить, что разработанная модель не учитывает сам процесс разрушения канала, когда его проводимость, а значит, и температура падают. Поэтому представленные расчеты есть не что иное, как "оценка" температуры сверху. Несмотря на это, максимальная температура даже в самом тонком канале ( $4 \times 4$  нм<sup>2</sup>) достигает "разумных" значений (примерно 1380°C), тогда как температура плавления кремния составляет 1410°C.

Учет излучения с открытой торцевой поверхности активного слоя вносит несущественную поправку (менее 1°C) в решение уравнения теплопроводности.

## ВЫВОДЫ

Проведено численное решение трехмерного уравнения теплопроводности в ячейке ReRAM SiO<sub>x</sub>, находящейся в низкоомном состоянии. Полученное решение имеет достаточно устойчивый характер по отношению к вариациям размеров моделируемой структуры, а также шагов временной и пространственной сетки.

Корректность модели подтверждается тремя фактами. Во-первых, максимальная площадь поперечного сечения проводящего канала, при которой достигаются температуры, достаточные для перехода в высокоомное состояние, не превышает  $7 \times 7$  нм<sup>2</sup>. Такой результат хорошо согласуется с экспериментальными данными других авторов, которые наблюдали в активном слое Si-нанокристаллиты с характерным размером примерно 5 нм.

Во-вторых, время, за которое температура достигает своего максимума (0,5 нс), не превышает времени переключения структуры в высокоомное состояние (50 нс).

В-третьих, максимальная расчетная температура не превосходит температуру плавления кремния, несмотря на то, что модель не учитывает процесс разрушения канала.

Представленная модель полезна при проектировании структур резистивной памяти и может быть использована для расчета минимальных топологических размеров ячейки ReRAM SiO<sub>x</sub>, при которых выделяемое в ней тепло не оказывает воздействие на состояние соседней ячейки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Yao J., Sun Z., Zhong L., Natelson D., Tour J.M.** Resistive Switches and Memories from Silicon Oxide // *Nano Lett.*, 2010. V. 10, P. 4105–4110.
2. **Yao J., Zhong L., Natelson D., Tour J.M.** Etching-Dependent Reproducible Memory Switching in Vertical SiO<sub>2</sub> Structures // *Appl. Phys. Lett.*, 2008. V. 93. P. 253101.
3. **Mehonic A. et al.** Electrically tailored resistance switching in silicon oxide // *Nanotechnology*. 2012. V. 23. P. 455201.
4. **Wang Y. et al.** Resistive switching mechanism in silicon highly rich SiO<sub>x</sub> ( $x < 0,75$ ) films based on silicon dangling bonds percolation mode // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. P. 042103.
5. **Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Матюшкин И.В.** Начальный этап термического окисления кремния и формирование пограничного слоя в системе Si-SiO<sub>2</sub> Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 2. С. 98–104.
6. **Yao J., Zhong L., Natelson D., Tour J.M.** In situ Imaging of the Conducting Filament in a Silicon Oxide Resistive Switch // *Nature Scientific Reports*, 2012. V. 2. P. 242.
7. **Калиткин Н.Е.** Численные методы. – М.: Наука, 1978.
8. **Yao J. et al.** Highly transparent nonvolatile resistive memory devices from silicon oxide and grapheme // *Nature communications*, 2012. V. 3. P. 1–8.

# АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПС СВЧ-ДИАПАЗОНА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

► К.А.Кагирина, Ю.В.Федоров, Д.В.Лаврухин, Д.Л.Гнатюк, А.В.Зуев, О.А.Рубан  
ИСВЧПЭ РАН

Предлагаются результаты исследования стойкости к воздействию внешних факторов преобразователей сигнала с частотой 57–64 ГГц, изготовленных на гетероструктурах AlGaN/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ИСВЧПЭ РАН. Под внешними факторами в работе подразумевается воздействие нейтронного излучения и гамма-излучения. Также приведены результаты изучения долговременной стабильности преобразователей сигнала.

## STABILITY ANALYSIS OF MICROWAVE SIGNAL CONVERTERS UNDER EXTERNAL INFLUENCES

K.A.Kagirina, Y.V.Fedorov, D.V.Lavruhin, D.L.Gnatuk, A.V.Zuev, O.A.Ruban  
IUHFSE RAS

The article presents the results of the study of resistance to external factors, signal transducers with frequency 57–64 GHz fabricated heterostructures AlGaN/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in ISVCHPE RAS. Under the external factors in the implied effects of neutron radiation and gamma radiation. Also, the results of the study of long-term stability of the signal converters.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ-диапазона находят свое применение в авиационной электронике и космических системах связи, которые подразумевают требования по стойкости МИС к воздействию внешних факторов. Поэтому актуальными являются исследования стойкости к перепадам температур и радиационному воздействию. Целью данной работы было изучение стойкости МИС преобразователей сигнала (ПС), изготовленных по технологии ИСВЧПЭ РАН, к воздействию потока нейтронов, гамма-излучения, а также их долговременной стабильности.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемый ПС объединяет в себе генератор, управляемый напряжением (ГУН), смеситель и усилитель промежуточной частоты (УПЧ). При разработке МИС ПС стояла задача достижения следующих значений электрических параметров: диапазон входного ВЧ-сигнала 57–64 ГГц, диапазон выходного ВЧ-сигнала до 2 ГГц, преобразования без потерь

(коэффициента преобразования  $K_{пр} > 0$  дБ), КСВН по входу ВЧ-сигнала не более 2, суммарный ток потребления не более 100 мА. Особенностью конструкции данного ПС является верхняя металлизация по слою фотолка – открытыми являются только контактные площадки. Фотография кристалла приведена на рис.1. Размеры изготовленных кристаллов ПС составляют 1,9×2,26 мм<sup>2</sup>.



Рис.1. Фотография кристалла МИС ПС

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Воздействие нейтронов

Облучение нейтронами проводилось при комнатной температуре в пассивном электрическом режиме на оборудовании ФГУП "НИИП". Кристаллы ПС подверглись воздействию нейтронов с энергиями  $\sim 1,4$  MeV при флюенсе  $\Phi \approx 2,6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и сопутствующей дозе гамма-излучения  $\sim 6,9$  кРад. Измерение СВЧ-параметров и потребляемых токов кристалла осуществлялось в ИСВЧПЭ РАН при комнатной температуре в одной и той же рабочей точке до и после облучения. Результаты этих измерений приведены в табл.1.

В табл.1 были использованы обозначения:  $f_{пч}$  – рабочий диапазон частот выходного сигнала ПЧ;  $I_{потр}$  – ток потребления (суммарный);  $K_{пр}$  – коэффициент преобразования.

Как видно, наблюдается изменение частоты сигнала ПЧ после воздействия на  $-3$ ,  $-2$ ,  $+27$  и  $+12\%$  для образцов № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Коэффициент преобразования образцов 1, 2 и 4 вырос на 21, 18 и 6%. Коэффициент преобразования образца 4 упал на 85%. Несмотря на изменения, измеренные после эксперимента значения всех параметров остались в пределах допустимого диапазона.

Токи потребления образцов 1 и 2 после воздействия изменились несущественным образом, в то время как для образцов 3 и 4 токи упали на 14 и 11%. Падение токов может быть связано с образованием в процессе облучения заряженных дефектов в области AlGaIn вблизи канала [1, 2].

### 2. Воздействие гамма-излучения

Испытания на стойкость к воздействию гамма-излучения проводились в АО "ЭНПО СПЭЛС" в активном электрическом режиме. В качестве источника гамма-излучения использовался ускоритель электронов, работающий в режиме тормозного излучения. Поглощенная доза ионизирующего излучения (ИИ) образцов составила  $D \gg 56$  кРад. Для контроля токов потребления в процессе облучения ПС были разварены в испытательную оснастку.

На рис.2 представлены зависимости тока потребления образцов ПС  $I_{потр}$ , нормированного на начальное значение тока, от поглощенной дозы ИИ.

На рис.2 видно, что ток потребления с увеличением дозы (времени облучения) растет, причем скорость роста тем больше, чем больше температура окружающей среды в процессе облучения.

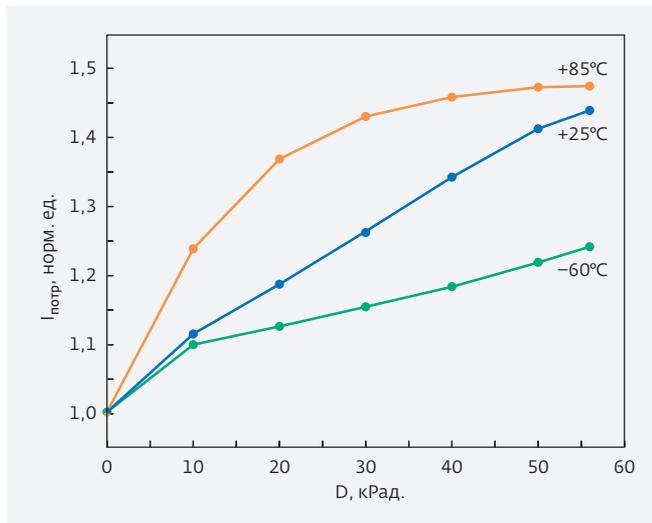


Рис.2. Изменение нормированного тока потребления ПС в процессе воздействия гамма-излучением

Кроме того, при температуре  $+85^\circ\text{C}$  наблюдается насыщение скорости роста тока потребления. Скорее всего, наблюдаемые различия в динамике тока потребления от времени связаны с неодинаковыми механизмами генерации и рекомбинации неравновесных носителей заряда в слое AlGaIn при разной температуре.

В табл.2 сравниваются значения параметров ПС до и после эксперимента. Все измерения проводились при комнатной температуре в неизменной рабочей точке.

В табл.2 использованы те же обозначения, что и в табл.1. После воздействия гамма-излучения изменение частоты ПЧ составило  $+11$  и  $-12\%$  для образцов 5 и 6 соответственно. В образце № 7 частота после эксперимента не изменилась. Коэффициент преобразования образца № 5 упал на 3%, образца № 6 – вырос на 88%, образца № 7 – увеличился на 60%. Значения всех параметров таблицы находятся в диапазоне допустимых значений.

Таблица 1. Результаты воздействия нейтронов

№ образца	$f_{пч}$ , ГГц		$I_{потр}$ , мА		$K_{пр}$ , дБ	
	до	после	до	после	до	после
1	1,043	1,013	90	92	10,4	12,6
2	0,873	0,770	100	98	8,3	9,8
3	1,043	1,328	98	84	2,65	0,4
4	1,013	1,133	89	79	3,1	3,3

**Таблица 2.** Результаты воздействия гамма-излучения

Образец №	Температура облучения		$f_{пч}$ , ГГц		$I_{потр}$ , мА		$K_{пр}$ , дБ	
	до	после	до	после	до	после	до	после
5	+85 °С	0,968	0,968	1,073	100	89	16,57	16,0
6	+25 °С	1,043	1,043	0,923	99	62	7,65	14,39
7	-60 °С	0,983	0,983	0,983	91	100	6,85	10,94

Ток образца № 5 упал примерно на 12%, образца 6 – на 40%, ток образца № 7 вырос на 9%. Снижение значений тока потребления после воздействия может быть связано с образованием структурных дефектов в области AlGaN, близкой к каналу [3, 4], которое приводит к понижению подвижности носителей в канале.

### 3. Изучение долговременной стабильности

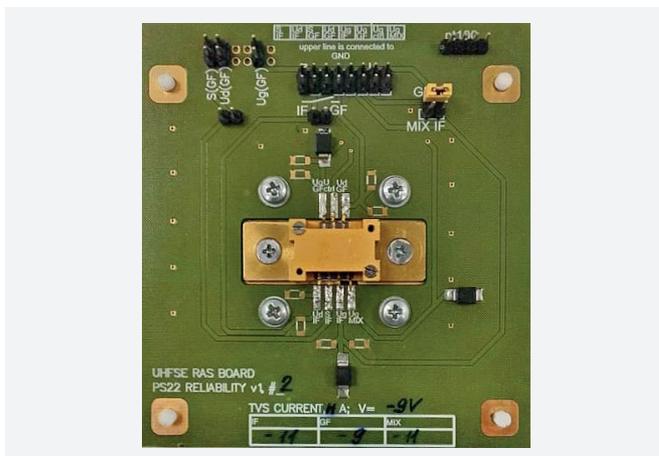
Изучение долговременной стабильности ПС проводилось в ИСВЧПЭ РАН. Для экспериментов чипы ПС были смонтированы в испытательную оснастку, показанную на рис.3. Данная оснастка позволяет проводить измерения высокочастотных характеристик кристалла в рабочей точке, контроль потребляемых токов, токов утечки и температуры чипа с помощью датчика температуры PT100.

В процессе экспериментов температура окружающей среды поддерживалась равной +85 °С. Образцы ПС № 8 и № 9 исследовались в циклическом режиме питания: 55 мин образец находится в активном режиме (питание включено), затем в течение

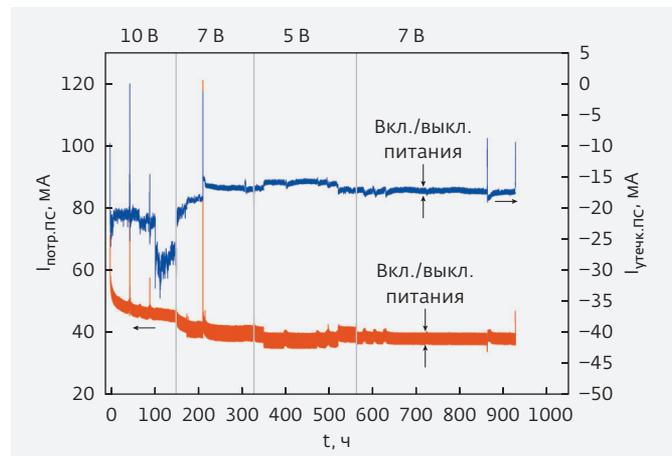
5 мин – в пассивном (питание отключено). Величина напряжения питания три раза изменялось: первые 170 ч  $U_{питПС}=10$  В, затем на 170 ч при  $U_{питПС}=5$  В и 560 ч при  $U_{питПС}=7$  В. Токи потребления непрерывно фиксировались. В качестве примера на рис.4 приведена динамика изменения токов потребления и утечки для образца № 8.

На рис.4 красной линией обозначены токи потребления образца № 8 при разных напряжениях питания, черной – токи утечки ПС. Желтыми вертикальными линиями обозначены временные зоны, в которых использовались различные значения  $U_{питПС}$  – 10, 7 или 5 В. В процессе 1000-часового эксперимента образцы несколько раз снимались для проведения контроля работоспособности и измерения СВЧ-параметров, при этом фиксировались импульсы тока потребления и утечки из-за переходных процессов при выходе на температурный режим.

Во время эксперимента суммарный ток потребления образца № 9 упал на 60% (на 52,9 мА) и суммарный ток утечки – на 33% (на 1,9 мкА). Ток потребления образца № 8 снизился примерно на 39% (на 23,0 мА), а ток утечки образца № 8 – на 33%



**Рис.3.** Фотография МИС ПС в испытательной оснастке (кристалл ПС закрыт крышкой)



**Рис.4.** Изменение токов  $I_{потрПС}$  и  $I_{утПС}$  в процессе изучения долговременной стабильности образцов ПС

(на 5,1 мкА). Отметим, что падение тока потребления на начальном этапе эксперимента (первые 50–100 ч) объясняется процессом термоэлектротренировки. Дальнейшее падение токов связано уже с образованием заряженных ловушек на поверхности AlGaIn, в подложке и в слое пассивации в процессе эксперимента [5].

После эксперимента были проведены измерения электрических параметров образцов № 8 и № 9 при комнатной температуре. Результаты измерений представлены в табл.3, из которой следует, что промежуточная частота образца № 8 после эксперимента выросла примерно на 15%, образца № 9 – незначительно уменьшилась (–2%). Коэффициент преобразования образца № 8 упал приблизительно на 29%, образца № 9 вырос на 38%. Суммарный ток потребления ПС № 8 после эксперимента упал на 23%, суммарный ток образца № 9 вырос на 3%. Все значения параметров в табл.3 находятся в диапазоне допустимых значений. Таким образом, в процессе изучения долговременной стабильности образцы ПС сохранили работоспособность.

## НОВИЗНА

Анализ состояния разработок МИС преобразователей сигнала разного типа для диапазона частот 57–64 ГГц показал, что в этом диапазоне применяются МИС, изготовленные по КМОП или SiGe-технологиям на подложках из кремния. На наногетероструктурах AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> изготавливают только отдельные компоненты (усилители, смесители и т.д.). Таким образом, авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты.

1. Впервые в России на наногетероструктурах AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> была разработана технология, позволяющая интегрировать на один кристалл все составляющие приемно-передающих устройств: ГУН, смеситель, усилитель ПЧ. Изготовленные по этой технологии ПС характеризуются диапазоном входного ВЧ-сигнала 57–64 ГГц, диапазоном выходного ВЧ-сигнала до 2 ГГц, КСВН по входу ВЧ-сигнала не более 2, суммарный ток потребления не более 100 мА. Коэффициент преобразования МИС ПС достигает 15 дБ и не уступает коэффициенту преобразования зарубежных аналогов.
2. Проведены исследования стойкости МИС ПС к воздействию потока нейтронов и гамма-излучения, а также долговременной стабильности. Разработанные и изготовленные МИС ПС

**Таблица 3.** Результаты изучения долговременной стабильности

Образец №	f <sub>пч</sub> , ГГц		I <sub>потр</sub> , мА		K <sub>пр</sub> , дБ	
	до	после	до	после	до	после
8	0,998	1,013	96	80	9,55	6,8
9	0,998	0,983	93	96	9,35	12,97

по техническому уровню находятся на уровне лучших мировых достижений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в России на наногетероструктурах AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были разработаны и изготовлены МИС ПС для диапазона частот 57–64 ГГц. Было проведено изучение стойкости этих ПС к воздействию нейтронного излучения и тормозного гамма-излучения, а также изучена надежность ПС. Проведенные исследования показали стойкость ПС к воздействию перечисленных факторов. Таким образом, МИС ПС ИСВЧПЭ РАН по техническому уровню соответствуют лучшим мировым достижениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ling., Jin-Cheng Z., Jun-Shuai X., Xiao-Hua M.** Neutron irradiation effects on AlGaIn/GaN high // Chinese Physics B. 2012.
2. **McClory J.W., C.Petrosky J.** Temperature Dependent Electrical Characteristics // IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE. 2007.
3. Gamma irradiation impact on electronic carrier transport in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [Журнал] / C.Schwarz, A.Yadav, M.Shatkhin, Flitsyan, L.Chernyak, V.Kasiyan, L.Liu // APPLIED PHYSICS LETTERS. 2012. 102.
4. 60Co gamma radiation effects on DC, RF, and pulsed I-V characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs [Журнал] / O.Aktas, A.Kuliev, V.Kumar, R.Schwindt, S.Toshkov, D.Costescu, J.Stubbins, I.Adesida // Solid-State Electronics. 2004. 48.
5. **Dammann M., Pletschen W., Waltereit P., Bronner W., Quay R., Muller S., Mikulla M., Ambacher O.** Reliability and Degradation Mechanism of AlGaIn/GaN HEMTs for Next Generation Mobile Communication Systems // Microelectronics Reliability. 2009, May. 49: Т. 5. С. 474–477.

### РАЗРАБОТКА GAAS И SIGE СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, БИБЛИОТЕК ЭЛЕМЕНТОВ И МОДУЛЕЙ САПР В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассматривается выполненный в Томском университете систем управления и радиоэлектроники комплекс исследований и разработок в области создания GaAs и SiGe СВЧ монолитных интегральных схем, библиотек элементов и модулей САПР. Представлено краткое описание разработанных методов и программных продуктов для автоматизации измерений, построения моделей активных и пассивных элементов, а также проектирования СВЧ МИС. Приведены характеристики разработанных библиотек элементов, а также СВЧ МИС на основе отечественных и зарубежных GaAs- и SiGe-технологий, включая малошумящие усилители, усилители мощности, смесители и управляющие устройства.

**Ключевые слова:** СВЧ, монолитные интегральные схемы, GaAs, SiGe, модели, библиотеки элементов, проектирование, САПР.

#### Сведения об авторах:

Бабак Леонид Иванович, доктор технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: leonid.babak@mail.ru

Черкашин Михаил Владимирович, кандидат технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: mcher@kcup.tusur.ru

Шеерман Федор Иванович, кандидат технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40;

Добуш Игорь Мирославович, кандидат технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: igadobush@gmail.com

Коколов Андрей Александрович, кандидат технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: kokolovaa@gmail.com

Сальников Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: ansalnikov@gmail.com

Калентьев Алексей Анатольевич, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: alexey.kalentyev@gmail.com

Гарайс Дмитрий Викторович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: dvgarays@gmail.com

Горяинов Александр Евгеньевич, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: goryainov.alex@gmail.com

Жабин Дмитрий Александрович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 40, e-mail: zhabin91@gmail.com

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕТЕРОДИНА С ПЕТЛЯМИ ФАПЧ КУ-ДИАПАЗОНА

В работе рассмотрены три варианта построения генератора СВЧ с петлей ФАПЧ Ку-диапазона. Выработаны критерии выбора оптимальной конструкции в зависимости от фазовых шумов ГУН.

**Ключевые слова:** генератор, петля ФАПЧ, среднеквадратическое отклонение фазового шума, фазовые шумы, оптимизация.

#### Сведения об авторах:

Баронов Алексей Алексеевич, Акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 115184, г. Москва, ул. Новокузнецкая, д. 1, стр. 3, оф. 35; e-mail: baronov@micro-wis.ru

Шадский Владимир Александрович, к.т.н., профессор, Акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 115184, г. Москва, ул. Новокузнецкая, д. 1, стр. 3, оф. 35; e-mail: shadskij@micro-wis.ru

### МИКРОЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ С-ДИАПАЗОНА

Представлено микроволновое устройство разделения поляризации, позволяющее восстанавливать сигналы круговой и линейной поляризации в С-диапазоне с развязкой по кросс-поляризации во всем рассматриваемом диапазоне частот не хуже 27 дБ. Приведена функциональная схема микроволнового устройства разделения поляризации.

**Ключевые слова:** поляризационная развязка, устройства разделения поляризации, поляризационное уплотнение.

#### Сведения об авторах:

Брагарь Андрей Павлович; Закрытое акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 123308, Россия, г. Москва, пр-т Маршала Жукова, д. 1, корп. 1; e-mail: bragar@micro-wis.ru

Шадский Владимир Александрович, к.т.н.; Закрытое акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 123308, Россия, г. Москва, пр-т Маршала Жукова, д. 1, корп. 1; e-mail: shadskij@micro-wis.ru

### DEVELOPMENT OF GAAS AND SIGE MMICS, PROCESS DESIGN KITS, AND EDA MODULES AT TOMSK STATE UNIVERSITY OF CONTROL SYSTEMS AND RADIOELECTRONICS.

The research in the area of development of GaAs and SiGe MMICs, process design kits (PDKs), and EDA modules that carried out at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics is presented. The techniques and software tools for the measurement automation, active and passive elements' model building, and MMIC design (synthesis) are described. Characteristics of PDKs (element model libraries) as well as GaAs/SiGe MMICs developed are considered including low noise and power amplifiers, mixers, and control circuits.

**Keywords:** microwaves, MMIC, GaAs, SiGe, element models, PDK, design, EDA.

#### Data of authors:

Babak Leonid Ivanovich., D.Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: leonid.babak@mail.ru,

Cherkashin Michail Vladimirovich., Ph.D., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: mcher@kcup.tusur.ru

Sheerman Pheodor Iwanovich., Ph.D. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation.

Dobush Igor Miroslovovich, Ph.D. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: igadobush@gmail.com

Kokolov Andrey Sergeevich., Ph.D. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: kokolovaa@gmail.com

Salnikov Andrey Sergeevich. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: ansalnikov@gmail.com

Kalentyev Aleksey Anatolevich., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: alexey.kalentyev@gmail.com

Garays Dmitry Viktorovich., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: dvgarays@gmail.com

Goryainov Aleksandr Evgenievich, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: goryainov.alex@gmail.com

Zhabin Dmitry Aleksandrovich Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: zhabin91@gmail.com

### DESIGN FEATURES OF THE LOCAL OSCILLATOR WITH A LOOP PLL KU-BAND

The paper considers three variants of construction of the microwave oscillator with PLL Ku-band. Developed selection criteria for the optimum design depending on phase noise VCO.

**Keywords:** oscillator, PLL, RMS noise instability, phase noise, optimization.

#### Data of authors:

Aleksey A. Baranov; Joint-Stock Company "Microwave Integrated Systems Institute", 115184, Russia, Moscow, Novokuzneckaya str., d. 1, stroenie 1, off. 35; e-mail: baronov@micro-wis.ru

Vladimir A. Shadskiy; Ph.D, professor, Joint-Stock Company "Institute of microwave integrated systems" 115184, Russia, Moscow, Novokuzneckaya str., d. 1, stroenie 1, off. 35; e-mail: shadskij@micro-wis.ru

### C-BAND MICROELECTRONIC POLARIZATION SEPARATOR

Compact microelectronic C-band polarization separator that recovers circular and line polarized signals with cross-polarization suppression more than 27dB across C-band is presented.

**Keywords:** Cross-polarization suppression, polarization separator, polarization sealing.

#### Data of authors:

Andrey P. Bragar, Joint-Stock Company "Microwave Integrated Systems Institute", 115184, Russia, Moscow, Novokuzneckaya str., d. 1, stroenie 1, off. 35; e-mail: bragar@micro-wis.ru

Vladimir A. Shadskiy, Joint-Stock Company "Institute of microwave integrated systems" 115184, Russia, Moscow, Novokuzneckaya str., d. 1, stroenie 1, off. 35; e-mail: shadskij@micro-wis.ru

### СВЕРХМАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

В статье рассматриваются несколько различных типов малошумящих и сверхмалошумящих усилителей (МШУ) и малошумящих преобразователей частоты (МШПр). Приводятся характеристики изделий с кратким рассмотрением особенностей конструкции.

**Ключевые слова:** малошумящий усилитель, малошумящий преобразователь частоты.

#### Сведения об авторах:

Давидов Рамаз Гурамович; Закрытое акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 123308, Россия, г. Москва, пр-т Маршала Жукова, д. 1, корп. 1; e-mail: gross215@ya.ru  
Кирпиченков Александр Иванович, к.т.н.; Закрытое акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 123308, Россия, г. Москва, пр-т Маршала Жукова, д. 1, корп. 1; e-mail: kirpichenkov@micro-wis.ru

### ТРАНЗИСТОРЫ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ С ЗАДАНЫМ ПОРОГОВЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В работе рассматривается технология изготовления транзисторов с затвором Шоттки на основе гетероструктур AlGaIn/GaN с заданным пороговым напряжением. Разработан технологический процесс подгонки порогового напряжения с помощью обработки слоя AlGaIn в подзатворной области во фторсодержащей плазме. Сформированы нормально открытые и нормально закрытые транзисторы Шоттки с заданными пороговыми напряжениями.

**Ключевые слова:** нитрид галлия, транзисторы Шоттки, углубленный затвор, плазменное травление

#### Сведения об авторах:

Гармаш Валентин Игоревич; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1; e-mail: garmashvalentine@gmail.com  
Егоркин Владимир Ильич; к.т.н.; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1; e-mail: egorkin@qdn.miee.ru  
Зайцев Алексей Александрович, к.т.н.; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", кафедра квантовой физики и нанозлектроники; МИЭТ, кафедра КФН; 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1; e-mail: Ziko27@yandex.ru  
Шмелев Сергей Сергеевич; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1; e-mail: shmelevkfn@yandex.ru

### РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА

Предложен схемотехнический и конструкторско-технологический вариант малошумящего усилителя (МШУ) X-диапазона с использованием переключателя на входе для работы в режимах большого и малого сигналов. Разработан и исследован опытный образец широкополосного малошумящего транзисторного усилителя X-диапазона, основанного на данном принципе.

**Ключевые слова:** малошумящий усилитель, динамический диапазон, коэффициент шума.

#### Сведения об авторах:

Кондукторов Александр Андреевич, акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 115184, г. Москва, ул. Новокузнецкая, д. 1, стр. 3, оф. 35; e-mail: konduktorov@micro-wis.ru  
Кирпиченков Александр Иванович, к.т.н., акционерное общество "Институт микроволновых интегральных систем", 115184, г. Москва, ул. Новокузнецкая, д. 1, стр. 3, оф. 35; e-mail: kirpichenkov@micro-wis.ru

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА В СОВРЕМЕННОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В ОАО "НИИМЭ и Микрон" построена новая современная фабрика и освоены технологии для производства микросхем с технологическим уровнем 180–90 нм. Технологии позволяют вести серийное изготовление микросхем с количеством более 100 млн. компонентов для коммерческой и промышленной аппаратуры и до 40–60 млн. компонентов для космической аппаратуры. Достигнутый уровень технологии гарантируется соблюдением высоких требований к технологическим процессам обработки пластин, необходимым уровнем и мощностью технологического и аналитического оборудования, а также непрерывным автоматизированным контролем всех элементов системы качества.

**Ключевые слова:** технологический уровень, система качества, квалификация технологий

#### Сведения об авторах:

Просий Антон Дмитриевич, 124460, Открытое акционерное общество "НИИМЭ и Микрон", Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: aprosii@micron.ru  
Ранчин Сергей Олегович, 124460, Открытое акционерное общество "НИИМЭ и Микрон", Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: sranchin@micron.ru  
Шелепин Николай Алексеевич, д.т.н., профессор; 124460, Открытое акционерное общество "НИИМЭ и Микрон", Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: shelepin@micron.ru

### SUPER LOW NOISE AMPLIFIERS AND CONVERTERS FOR RADIO ASTRONOMY

The article deals with several different types of low noise and ultra-low-noise amplifier (LNA) and low-noise blocs (LNB). The characteristics of products with a brief consideration of the features construction.

**Keywords:** low noise and ultra-low-noise amplifier (LNA) and low-noise blocs (LNB).

#### Data of authors:

Davidov Ramaz, Joint-Stock Company "Institute of microwave integrated systems" 123308, Russia, Moscow, Prospect Marshal Zhukov Str. 1, Bldg. 1, e-mail: gross215@ya.ru  
Kirpichenkov Alexander, Ph.D., Joint-Stock Company "Institute of microwave integrated systems" 123308, Russia, Moscow, Prospect Marshal Zhukov Str. 1, Bldg. 1, e-mail: kirpichenkov@micro-wis.ru

### GALLIUM NITRIDE BASED SCHOTTKY TRANSISTORS THRESHOLD VOLTAGE ADJUSTMENT

We have proposed and fabricated AlGaIn/GaN based Schottky transistor, employing the recessed gate edge structure. The threshold voltage is selected by adjusting fluorine plasma treatment AlGaIn gate layer. Fabricated normally-on and normally-off gallium nitride based Schottky transistors.

**Keywords:** gallium nitride, Schottky transistor, recessed gate, plasma etching

#### Data of authors:

Garmash Valentin Igorevich, National Research University – Moscow Institute of Electronic Technic. Bld.1, Shokin Square Zelenograd, Moscow, Russia.124498 e-mail: garmashvalentine@gmail.com  
Egorkin Vladimir.Ilich, Ph. d., National Research University – Moscow Institute of Electronic Technic. Bld.1, Shokin Square Zelenograd, Moscow, Russia.124498 e-mail: egorkin@qdn.miee.ru  
Zaytsev Alexey Alexandrovich, Ph. d. National Research University – Moscow Institute of Electronic Technic. Bld.1, Shokin Square Zelenograd, Moscow, Russia.124498 e-mail: Ziko27@yandex.ru  
Shmelev Syrgyev Sergeevich, National Research University – Moscow Institute of Electronic Technic. Bld.1, Shokin Square Zelenograd, Moscow, Russia.124498 e-mail: shmelevkfn@yandex.ru

### THE EXTENSION OF X-BAND LOW NOISE AMPLIFIER DYNAMIC RANGE

The circuitry and design-technology variants of X-band low-noise amplifier with switch use on input for operation in modes of high and small signals is offered. The prototype of the X-band low-noise wideband transistor amplifier based on this principle is developed and probed.

**Keywords:** low-noise amplifier, dynamic range, noise figure.

#### Data of authors:

Aleksandr A. Konduktorov, Joint-Stock Company "Microwave Integrated Systems Institute", 115184, Russia, Moscow, Novokuzneckaya str., d. 1, stroenie 1, off. 35; e-mail: konduktorov@micro-wis.ru  
Aleksandr I. Kirpichenkov, Joint-Stock Company "Microwave Integrated Systems Institute", 115184, Russia, Moscow, Novokuzneckaya str., d. 1, stroenie 1, off. 35; e-mail: kirpichenkov@micro-wis.ru

### QUALITY ASSURANCE IN MODERN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING

JSC Mikron has built a new modern factory and mastered technology for production of chips with the technological node 180–90 nm. Technology allows the manufacture of chips with more than 100 million components for commercial and industrial equipment and up to 40–60 million components for space equipment. This level of technology can only be assured by observance of high requirements to technological processes of processing of wafers, to ensure the required level and working capacity of technological and analytical equipment and ensure continuous computer control of all elements of the quality system.

**Keywords:** technological level, quality system, qualification of technology

#### Data of authors:

Prosii Anton Dmitrievich, JSC Mikron, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: aprosii@micron.ru  
Ranchin Sergej Olegovich, JSC Mikron, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: sranchin@micron.ru  
Chelepin Nikolaj Alexeevich, Dr.Sci., professor, JSC Mikron, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: shelepin@micron.ru

### ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЭФФЕКТ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛАЗМОЙ В КАНАЛЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В работе экспериментально исследовано влияние постоянного тока в канале полевого транзистора на детектирование терагерцового излучения двумерной электронной плазмой в перпендикулярной плоскости плазмы в магнитном поле. Показано, что наличие тока приводит к размытию осцилляций сигнала детектирования как функции магнитного поля, обусловленных эффектом Шубникова-де Гааза. Обнаружено, что при определенных условиях наличие постоянного тока приводит к дополнительному увеличению сигнала детектирования.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, двумерная электронная плазма, детектирование, магнитное поле, полевой транзистор.

#### Сведения об авторах

Клименко Олег Александрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия 119991 Москва, Ленинский проспект, 53, e-mail: oleg.klimenko@mail.ru, +7-499-132-6744

Митягин Юрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия 119991 Москва, Ленинский проспект, 53, e-mail: mityagin@sci.lebedev.ru

Мурзин Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия 119991 Москва, Ленинский проспект, 53, e-mail: murzin@sci.lebedev.ru

Нина Владимировна Дьяконова, к.ф.-м.н., Лаборатория им. Шарля Кулона, UMR5221 НЦНИ-Университет Монпелье 2, Пляссадь Е. Батайон, Монпелье 34095 Франция. e-mail: nina.diaakonova@univ-montp2.fr  
Войчех Кнап; д.ф.-м.н.; Лаборатория им. Шарля Кулона, UMR5221 НЦНИ-Университет Монпелье 2, Пляссадь Е. Батайон, Монпелье 34095 Франция, e-mail: knap@univ-montp2.fr

### МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОНОВ И ПРИРОДА ЛОВУШЕК В ТОНКИХ СЛОЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКСИДА НА КРЕМНИИ ПОСЛЕ ПРОТЕКАНИЯ ЗАРЯДА

Экспериментально изучено явление SILC (Stress Induced Leakage Current) в термическом оксиде кремния. Показано, что в режиме SILC транспорт заряда в SiO<sub>2</sub> лимитируется фонон-облегченным туннелированием между ловушками, в качестве которых выступают вакансии кислорода. При протекании заряда происходит генерация вакансий кислорода, что увеличивает токи утечки. Оценены термическая и оптическая энергии ловушки. Выявлено, что длительный отжиг при повышенной температуре приводит к рекомбинации вакансий кислорода с междоузельным кислородом и уменьшению токов утечки до начального уровня.

**Ключевые слова:** оксид кремния, вакансия кислорода, транспорт заряда, деградация полупроводниковых приборов, токи утечки.

#### Сведения об авторах:

Гриценко Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.; Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева д.13, 630090; (совм.) Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д.2, 630090; e-mail: grits@isp.nsc.ru

Исламов Дамир Ревинирович, к.ф.-м.н.; Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, д.13, 630090; (совм.) Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, д.2, г. Новосибирск, 630090; e-mail: damir@isp.nsc.ru

Орлов Олег Михайлович, к.тех.н.; Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", Россия, Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, 103460; e-mail: oorlov@mikron.ru

Красников Геннадий Яковлевич, академик Российской академии наук; Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", Россия, Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, г. Зеленоград, Россия, 103460; e-mail: krasnikov@mikron.ru

Морозов Евгений Николаевич; Открытое акционерное общество "НИИ молекулярной электроники и завод "Микрон", 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, г. Зеленоград, Россия, 103460; e-mail: emorozov@mikron.ru

### DIRECT CURRENT INFLUENCE ON TERAHERTZ RADIATION DETECTION BY 2D ELECTRON PLASMA IN THE CHANNEL OF A FIELD EFFECT TRANSISTOR IN MAGNETIC FIELD

We present experimental results of direct current effect on terahertz radiation detection by 2D electron plasma in the channel of a field effect transistor placed in magnetic field normal to the plasma plane. We show that the direct source-drain current causes oscillations decay of the detection signal as a function of magnetic field. We also found that under certain conditions the DC current leads to an additional increase of the detection signal in magnetic field.

**Keywords:** terahertz radiation, 2D electron plasma, magnetic field, detection, field effect transistor.

#### Date of authors:

Klimenko Oleg. I., Ph.D. Federal state budgetary institution of science Physical institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Leninsky Avenue, 53, e-mail: oleg.klimenko@mail.ru

Mityagin Yuriy A. Ph.D., Federal state budgetary institution of science Physical institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Leninsky Avenue, 53, e-mail: mityagin@sci.lebedev.ru.

Murzin Vladimir. I. Dr.Sc., Federal state budgetary institution of science Physical institute of the Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Leninsky Avenue, 53, e-mail: murzin@sci.lebedev.ru

Djakonova Nina V., Ph.D.

Charles Coulomb Laboratory, UMR 5221 CNRS-University Montpellier II, Place E.Bataillon, Montpellier 34095 France, e-mail: nina.diaakonova@univ-montp2.fr

Knap Wojciech. Charles Coulomb Laboratory, UMR 5221 CNRS-University Montpellier II, Place E.Bataillon, Montpellier 34095 France, e-mail: knap@univ-montp2.fr

### MECHANISM OF ELECTRON TRANSPORT AND TRAP NATURE IN THIN LAYERS OF THERMAL OXIDE ON SILICON AFTER CHARGE FLOWING

SILC phenomenon in thermal silica was studied experimentally. It is shown that the charge transport mechanism in SILC is phonon-assisted tunneling between traps, and oxygen vacancies act as the traps. The flow of charge through SiO<sub>2</sub> generates oxygen vacancies, increasing the leakage currents. Thermal and optical trap energies were evaluated. It was revealed that long-time annealing at high temperature leads to recombination of oxygen vacancies with interstitial oxygen and reduction of leakage currents to initial level.

**Keywords:** silica, oxygen vacancy, charge transport, degradation of semiconductor devices, the leakage currents.

#### Date of authors:

Gritsenko Vladimir A., DrSc; Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Lavrentieva ave. 13, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Novosibirsk State University, Pirogova st. 2, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; e-mail: grits@isp.nsc.ru

Islamov Damir R., Ph.D; Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Lavrentieva ave. 13, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Novosibirsk State University, Pirogova st. 2, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; e-mail: damir@isp.nsc.ru

Orlov Oleg M.; Ph.d; Stock Company "Molecular Electronics Research Institute" (MERI); 1st Zapadny proezd 12/1, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: oorlov@mikron.ru

Krasnikov Gennady Ya; Dr Sci; RAS academician; Stock Company "Molecular Electronics Research Institute"; 1st Zapadny proezd 12/1, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: krasnikov@mikron.ru

e-mail: krasnikov@mikron.ru

Morozov Evgeniy N.; Joint Stock Company "Mikron"; 1st Zapadny proezd 12/1, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: emorozov@mikron.ru

e-mail: emorozov@mikron.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ FRAM И RERAM, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

В работе представлены результаты исследований структурных и электрических свойств материалов на основе оксида гафния? выращенных методом АСО, показана возможность и перспективы использования их наноразмерных слоев в элементах энергонезависимой памяти типа FRAM и ReRAM.

**Ключевые слова:** резистивное переключение, сегнетоэлектричество, FRAM, ReRAM, атомно-слоевое осаждение, энергонезависимая память.

#### Данные об авторах:

Орлов Олег Михайлович; кандидат технических наук; Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, г. Зеленоград, Россия, 103460; e-mail: oorlov@mikron.ru

Маркеев Андрей Михайлович, к.ф.-м.н., Московский физико-технический институт, (Государственный университет), 141700 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9; e-mail: amarkeev@mail.mipt.ru

Зенкевич Андрей Владимирович, к.ф.-м.н., Московский физико-технический институт, (Государственный университет), 141700 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9; e-mail: zenkevich.av@mipt.ru

Черникова Анна Георгиевна, Московский физико-технический институт, (Государственный университет), 141700 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9; e-mail: blacknikova@gmail.com

Егоров Константин Викторович, аспирант, Московский физико-технический институт, (Государственный университет), 141700 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9; e-mail: egorov.constantin@gmail.com

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЯЧЕЙКЕ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ

Построена математическая модель элемента резистивной памяти на основе диоксида кремния, позволяющая численно решить уравнение теплопроводности по неявной локально-одномерной схеме. Показано, что решение слабо зависит от параметров модели и численной схемы. Результаты моделирования, а именно площадь сечения канала проводимости и время перехода в стационарное состояние согласуются с экспериментальными результатами других авторов.

**Ключевые слова:** резистивная память, диоксид кремния, распределение температуры

#### Сведения об авторах

Захаров Павел Сергеевич;

АО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: - pzakharov@mikron.ru.

Итальянцев Александр Георгиевич, д.ф. – м.н., профессор; АО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: aitalyantsev@mikron.ru.

### АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПС СВЧ-ДИАПАЗОНА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Предлагаются результаты исследования стойкости к воздействию внешних факторов преобразователей сигнала с частотой 57–64 ГГц, изготовленных на гетероструктурах AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук. Под внешними факторами в работе подразумевается воздействие нейтронного излучения и гамма-излучения. Также приведены результаты изучения долговременной стабильности преобразователей сигнала.

**Ключевые слова:** наногетероструктуры AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, СВЧ, радиационная стойкость, надежность.

#### Сведения об авторах:

Казирина Ксения Алексеевна; Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Федоров Юрий Владимирович; Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5; e-mail: yuraf2002@mail.ru

Лаврухин Денис Владимирович; Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5; e-mail: denis\_lavruhin@mail.ru

Гнатюк Дмитрий Леонидович; Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Зуев Александр Владимирович; Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Рубан Олег Анатольевич; Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

### RESEARCH FEATURES OF FRAM AND RERAM NON-VOLATILE MEMORY DEVICES BASED ON ALD PROCESSES

Research results of structural and electrical properties of the materials based on ALD HfO<sub>2</sub> were investigated. The possibility and application perspectives of nanoscale layers for FRAM and ReRAM non-volatile memory was demonstrated.

**Keywords:** resistive switching, ferroelectricity, FRAM, ReRAM, ALD (Atomic Layer Deposition), non-volatile memory

#### Data of authors:

Orlov Oleg Mikhailovich; PhD; Stock Company "Molecular Electronics Research Institute", 1st Zapadny proezd 12/1, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: oorlov@mikron.ru

Markeev Andrey Mikhailovich, Ph.D., Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow region, Russia, 141700; e-mail: amarkeev@mail.mipt.ru

Zenkevich Andrey Vladimirovich, Ph.D., Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow region, Russia, 141700, e-mail: zenkevich.av@mipt.ru

Anna Georgievna Chernikova, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow region, Russia, 141700; e-mail: blacknikova@gmail.com

Konstantin Egorov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow region, Russia, 141700; e-mail: egorov.constantin@gmail.com

### TEMPERATURE CALCULATION FOR SILICA-BASED RESISTIVE MEMORY DEVICES

A mathematical model intended for numerical calculation of heat equation for silica-based resistive memory device has been made. The model uses implicit locally one-dimensional scheme. It has been shown that the numerical solution of the equation has weak dependence on model parameters and numerical scheme parameters. The modelling results such as filament cross section and time required to establish a stationary state are in a good agreement with experimental data.

**Key words:** resistive memory, silica, temperature distribution.

#### Data of authors

Pavel S. Zakharov; JSC Molecular electronics research institute, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: pzakharov@mikron.ru,

Alexander G. Italyantsev, Dr. Sci., professor; Molecular electronics research institute, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: aitalyantsev@mikron.ru.

### STABILITY ANALYSIS OF MICROWAVE SIGNAL CONVERTERS UNDER EXTERNAL INFLUENCES

The article presents the results of the study of resistance to external factors, signal transducers with frequency 57–64 GHz fabricated heterostructures AlGaIn / GaN / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in ISVCHPE RAS. Under the external factors in the implied effects of neutron radiation and gamma radiation. Also, the results of the study of long-term stability of the signal converters.

**Keywords:** nanoheterostructures AlGaIn / GaN / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, EHF, radiation resistance and reliability.

#### Data of authors:

Kseniya A. Kazirina, Institute on ultra-high frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences, 117105, Russian Federation, Moscow, Nagorny proezd 7, bld 5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Yurii V. Fedorov, Institute on ultra-high frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences, 117105, Russian Federation, Moscow, Nagorny proezd 7, bld 5; e-mail: yuraf2002@mail.ru

Denis V. Lavruhin, Institute on ultra-high frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences, 117105, Russian Federation, Moscow, Nagorny proezd 7, bld 5; e-mail: denis\_lavruhin@mail.ru

Dmitry L. Gnatuk, Institute on ultra-high frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences, 117105, Russian Federation, Moscow, Nagorny proezd 7, bld 5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Alexander V. Zuev, Institute on ultra-high frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences, 117105, Russian Federation, Moscow, Nagorny proezd 7, bld 5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Oleg A. Ruban, Institute on ultra-high frequency semiconductor electronics of Russian academy of sciences, 117105, Russian Federation, Moscow, Nagorny proezd 7, bld 5; e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru