



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

**СЕРИЯ 3
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 2(198) 2025

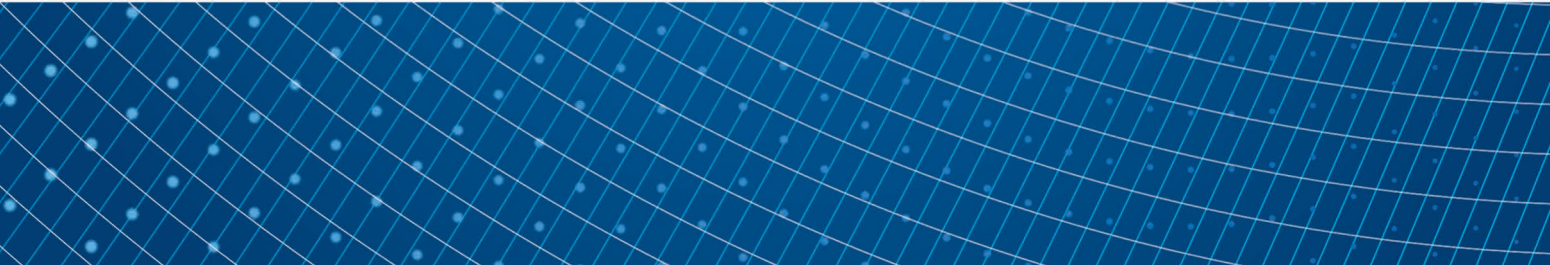
ELECTRONIC ENGINEERING

**SERIES 3
MICROELECTRONICS**

Scientific & Technical Journal

Issue 2(198) 2025

Москва, 2025



«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.**Серия 3.****МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»****Редакционный совет****Главный редактор****Красников Геннадий Яковлевич,**
академик РАН**Члены редакционного совета****Асеев Александр Леонидович,**
академик РАН**Baklanov M. R., Sc. D.****Бетелин Владимир Борисович,**
академик РАН**Бокарев Валерий Павлович,**
ответственный секретарь, д. т. н.**Быков Виктор Александрович,**
д. т. н.**Галиев Галиб Бариевич, д.ф.-м.н.****Горбачевич Александр Алексеевич,**
академик РАН**Горнев Евгений Сергеевич,**
зам. главного редактора,
академик РАН**Ким Александр Кирилович, к. т. н.****Критенко Михаил Иванович, к. т. н.****Maev Roman Gr., Sc. D.****Петричкович Ярослав Ярославович,**
д. т. н.**Рощупкин Дмитрий Валентинович,**
член-корреспондент РАН**Сигов Александр Сергеевич,**
академик РАН**Стемпковский Александр**
Леонидович, академик РАН**Чаплыгин Юрий Александрович,**
академик РАН**Шелепин Николай Алексеевич,**
зам. главного редактора, д. т. н.**Эннс Виктор Иванович, д. т. н.****Адрес редакции**✉ Россия, 124460, Москва,
Зеленоград, улица Академика
Валиева, дом 6, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издаётся с 1965 года

УчредительАО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»**Слово редактора 4****Разработка и конструирование****Е.О. Белоусов, Д.В. Кочетков, К.М. Моленкамп,**
П.А. Паташев, А.В. Эннс, Н.А. Шелепин. Схема обработки
сигналов матриц считывания излучения с подавлением шума
и неоднородностей 5**E.O. Belousov, D.V. Kochetkov, K.M. Molenkamp, P.A. Patashev,**
A.V. Enns, N.A. Shelepin. Readout circuit for radiation sensing
with noise and non-uniformity rejection 14**Н.В. Воронова, О.А. Тельминов, С.И. Янович, Д.А. Винник,**
А.С. Чернуха. Примеры применения плёнок IGZO в биосенсорике .. 22**А.К. Аполихин, М.А. Барабанов, А.А. Григорьева,**
С.С. Демичев, А.Д. Калёнов, А.Р. Мордыга, С.О. Насруллаев,
Б.В. Русановский, А.М. Силантьев. Микроконтроллер на базе
ядра SCR1 27**Процессы и технология****А.А. Мошаров, Г.В. Баранов, С.С. Гусев, А.В. Нуштаев,**
Е.Ю. Котляров, П.В. Панасенко. Исследование
зависимости высокочастотных характеристик схем на основе
КМОП КНИ-технологии «90 нм» от параметров конструкции
межсоединений транзисторов 32**Д.В. Сорокин, Н.А. Шелепин.** Особенности встраивания
элементов энергонезависимой памяти в КМОП-технологию 41**Свойства материалов****Д.Ю. Федулов, К.Е. Каменцев, А.А. Буш.** Диэлектрические
свойства керамических образцов системы
(1-x)BaTiO₃ · xPbFe_{2/3}W_{1/3}O₃, x = 0...0,10 с добавками легкоплавких
компонент Pb₅Ge₃O₁₁ и Na₂B₄O₇ 52**Математическое моделирование****В.Д. Алексеев, А.С. Тишин, В.Ю. Михайлов.** Исследование
распознаваемости утечки информации по сторонним каналам
электропитания при операции записи в регистр с использованием
ПЛИС 62**М.В. Цепкин, А.А. Резванов.** Модельно-аналитическое
исследование электромеханических свойств гибридных
органо-силикатных плёнок 77**M.V. Tsepkin, A.A. Rezvanov.** Modeling and analytical study
of electromechanical properties of hybrid organosilicate films 85**Аннотации 92**Журнал включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК)
в число изданий, рекомендованных для публикации статей
соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук № 2906

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

**Editorial Council
Chief Editor**

Krasnikov G. Ya.,
Full Member of the RAS

The Members of Editorial Council

Aseev A. L.,
Full Member of the RAS
Baklanov M. R., Sc. D.
Betelin V. B.,
Full Member of the RAS
Bokarev V. P., Sc. D.,
Responsible Secretary
Bykov V. A., Sc. D.
Galiev G. B., Sc. D.
Gorbatsevich A. A.,
Full Member of the RAS
Gornev E. S.,
Full Member of the RAS
of the RAS, Deputy Chief Editor
Kim A. K., Ph. D.
Kritenko M. I., Ph. D.
Maev Roman Gr., Sc. D.
Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.
Roshchupkin D.V.,
Corresponding Member of the RAS
Sigov A. S.,
Full Member of the RAS
Stempkovskiy A. L.,
Full Member of the RAS
Chaplygin Yu. A.,
Full Member of the RAS
Shelepin N. A.,
Deputy Chief Editor, Sc. D.
Enns V. I., Sc. D.

Editorial Staff Address

✉ 6/1, Akademika Valieva street,
Zelenograd, Moscow 124460,
Russian Federation
☎ +7 495 229-70-43
✉ journal_EEM-3@mikron.ru
www.niime.ru/
zhurnal-mikroelektronika
The journal is published since 1965

Founder

"Molecular Electronics Research
Institute", Stock Company

Editor's Column 4

Development and designing

**E.O. Belousov, D.V. Kochetkov, K.M. Molenkamp,
P.A. Patashev, A.V. Enns, N.A. Shelepin.** Readout circuit
for radiation sensing with noise and non-uniformity rejection 5, 14
**N.V. Voronova, O.A. Telminov, S.I. Yanovich, D.A. Vinnik,
A.S. Chernukha.** Examles of IGZO films applications in biosensing..... 22
**A.K. Apolikhin, M.A. Barabanov, A.A. Grigoreva,
S.S. Demichev, A.D. Kalyonov, A.P. Mordyga, S.O. Nasrullaev,
B.V. Rusanovskiy, A.M. Silantiev.** Microcontroller based on core
SCR1 27

Processes and technology

**A.A. Mosharov, G.V. Baranov, S.S. Gusev, A.V. Nushtaev,
E.U. Kotlyarov, P.V. Panasenko.** Analysis of high frequency
characteristics dependence of 90nm SOI CMOS technology based
circuits on design parameters of transistor interconnects 32
D.V. Sorokin, N.A. Shelepin. Features of embedding non-volatile
memory elements in CMOS technology 41

Properties of Materials

D.Yu. Fedulov, K.E. Kamentsev, A.A. Bush. Dielectric properties
of ceramic samples of the $(1-x)\text{BaTiO}_3 \cdot x\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, $x = 0-0.10$
system with additives of low-melting components $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$
and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 52

Mathematical simulation

V.D. Alekseev, A.S. Tishin, V.Y. Mikhailov. An investigation
of information leakage recognizability of register write operation
through side-channel power channels using FPGA 62
M.V. Tsepkin, A.A. Rezvanov. Modeling and analytical study
of electromechanical properties of hybrid organosilicate films 77, 85

Abstracts 92

The journal has included in the number of publications recommended
for publication of articles by applicants for academic degrees
of candidate and doctor of Sciences № 2906 by the Higher attestation
Commission (HAC)

СХЕМА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МАТРИЦ СЧИТЫВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОДАВЛЕНИЕМ ШУМА И НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

В статье представлена схема обработки сигналов матрицы для считывания падающего излучения, модифицированная для уменьшения токов перезаряда паразитных ёмкостей и неоднородностей по вертикальной оси изображения.

Для снижения уровня шума, возникающего на выходе схемы обработки столбца, были предложены малошумящие схемы формирования напряжения смещения, обеспечивающие формирование заданного значения тока через активные элементы и элементы компенсации фонового излучения. Описанные схемы также позволяют снизить влияние фликкер-шума и компенсировать единичные неоднородности изображения. Полученное при моделировании среднеквадратичное значение шума СКЗ на выходе составляет не более 1,55 МЗР при 14-разрядном выходном коде.

Ключевые слова: КМДП-технология, схемы считывания излучения, малошумящие схемы обработки сигналов.

Сведения об авторах:

Беловусов Егор Олегович, кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: ebelousov@niime.ru;

Кочетков Дмитрий Валерьевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: dkochetkov@niime.ru;

Моленкамп Ксения Михайловна, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: kmolenkamp@niime.ru;

Паташев Павел Алексеевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: ppatashev@niime.ru;

Эннс Александр Викторович, кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: aenns@niime.ru;

Эннс Виктор Иванович, доктор технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: venns@niime.ru

READOUT CIRCUIT FOR RADIATION SENSOR WITH NOISE AND NON-UNIFORMITY REJECTION

The article presents a radiation reading column readout circuit modified to reduce the recharge currents of parasitic capacitances and non-uniformity along the vertical axis. To reduce the noise level at the output of the column processing circuit, low-noise bias voltage generation circuits for the readout circuit were proposed, providing the generation of a specified current value through background compensation and active elements. The described circuits also reduce the effect of flicker noise and compensate for single pixel non-ideality. The resulting noise RMS value at the output is no more than 1.55 LSB with a 14-bit output code.

Keywords: CMOS technology, analog to digital converters, radiation sensor circuits, low-noise circuits.

Data of authors:

Belousov Egor Olegovich, Candidate of Engineering Sciences, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: ebelousov@niime.ru;

Kochetkov Dmitry Valeryevich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: dkochetkov@niime.ru;

Molenkamp Ksenia Mikhailovna, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: kmolenkamp@niime.ru;

Patashchev Pavel Alekseevich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: ppatashev@niime.ru;

Enns Aleksandr Viktorovich, Candidate of Engineering Sciences, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: aenns@niime.ru;

Enns Viktor Ivanovich, Doctor of Engineering Sciences, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: venns@niime.ru

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЁНОК IGZO В БИОСЕНСОРИКЕ

Описаны типы биосенсоров, существующих на данный момент: амперометрические, потенциометрические и кондуктометрические. Приводятся примеры с данными по чувствительности. Рассматриваются примеры датчиков на основе IGZO, их преимущества и уникальные свойства.

Ключевые слова: биосенсор, полевой транзистор, газовый датчик, пленки IGZO.

Сведения об авторах:

Воронова Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: navoronova@niime.ru;

Тельминов Олег Александрович, кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» АО «НИИМЭ», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: otelminov@niime.ru;

Янович Сергей Игоревич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: syanovich@niime.ru;

Винник Денис Александрович, доктор химических наук, профессор, профессор Российской академии наук, Московский физико-технический институт, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, e-mail: vinnik.da@mipt.ru;

Чернуха Александр Сергеевич, кандидат химических наук, Московский физико-технический институт, 141700 Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, e-mail: chernukha.as@mipt.ru

EXAMLES OF IGZO FILMS APPLICATIONS IN BIOSENSING

The article is devoted to the description of the types of biosensors currently available: amperometric potentiometric and conductometric. Examples with sensitivity data are given. Examples of IGZO-based sensors are considered, their advantages and unique properties are discussed.

Keywords: biosensor, field-effect transistor, gas sensor, IGZO films.

Data of authors:

Voronova Natalia Vladimirovna, Ph.D in Physics and Mathematics "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Akademika Valiev Street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: navoronova@niime.ru;

Telminov Oleg Aleksandrovich, Ph.D. in Technology, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Akademika Valiev Street, 6/1, 124460, Zelenograd, Russia, Moscow, e-mail: otelminov@niime.ru;

Yanovich Sergey Igorevich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 6/1 Academician Valiev Street, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: syanovich@niime.ru;

Vinnik Denis Alexandrovich, Dr.Sc. in Chemistry, Moscow Institute of Physics and Technology "MIPT (National Research University)", 141700, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky per., 9, e-mail: vinnik.da@mipt.ru;

Chernukha Aleksander Sergeevich, Ph.D in Chemistry, Moscow Institute of Physics and Technology "MIPT (National Research University)", 141700, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky per., 9, e-mail: chernukha.as@mipt.ru

МИКРОКОНТРОЛЛЕР НА БАЗЕ ЯДРА SCR1

В статье представлено архитектурное и топологическое представления разработанного микроконтроллера на базе вычислительного ядра SCR1, 2 UART, 1 SPI, 32 портами GPIO и 14-разрядным АЦП по технологии HCMOS8D на основе сервиса MPW.

Ключевые слова: микроконтроллер, АЦП, MPW, SCR1, RISC-V.

Сведения об авторах:

Аполихин Андрей Константинович, ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15, e-mail: a.apolikhin@yadro.com;
 Барабанов Миша Александрович ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15, e-mail: m.barabanov@yadro.com;
 Григорьева Анастасия Андреевна, ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15, e-mail: a.grigoreva@yadro.com;
 Демичев Сергей Сергеевич, ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15, e-mail: s.demichev@yadro.com;
 Мордыга Артем Романович, ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15, e-mail: a.mordyga@yadro.com;
 Насруллаев Суннатбек Отабек угли, ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15, e-mail: s.nasrullaev@yadro.com;
 Русановский Богдан Витальевич, ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15, e-mail: b.rusanovskiy@yadro.com;
 Силантьев Александр Михайлович, НИУ «Московский институт электронной техники», 124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 1, e-mail: silantiev@org.miet.ru;
 Калёнов Александр Дмитриевич, НИУ «Московский институт электронной техники», 124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 1, e-mail: kalyonov.alex@yandex.ru

MICROCONTROLLER BASED ON CORE SCR1

The paper presents the architectural and topological representation of the developed microcontroller based on SCR1 computational core, 2 UART, 1 SPI, 32 GPIO ports and 14-bit ADC using HCMOS8D technology based on MPW service.

Keywords: microcontroller, ADC, MPW, SCR1, RISC-V.

Data of authors:

Apolikhin Andrei Konstantinovich, KNS GROUP Limited Liability Company, ul. Rochdel'skaya, d. 15, str. 15, Moscow, 123376, Russian Federation, e-mail: a.apolikhin@yadro.com;
 Barabanov Misha Aleksandrovich, KNS GROUP Limited Liability Company, ul. Rochdel'skaya, d. 15, str. 15, Moscow, 123376, Russian Federation, e-mail: m.barabanov@yadro.com;
 Grigoreva Anastasia Andreevna, KNS GROUP Limited Liability Company, d. 15, str. 15, Moscow, 123376, Russian Federation, e-mail: a.grigoreva@yadro.com;
 Demichev Sergei Sergeevich, KNS GROUP Limited Liability Company, d. 15, str. 15, Moscow, 123376, Russian Federation, e-mail: s.demichev@yadro.com;
 Mordyga Artem Romanovich, KNS GROUP Limited Liability Company, d. 15, str. 15, Moscow, 123376, Russian Federation, e-mail: a.mordyga@yadro.com;
 Nasrullaev Sunnatbek Otabek, KNS GROUP Limited Liability Company, d. 15, str. 15, Moscow, 123376, Russian Federation, e-mail: a.mordyga@yadro.com;
 Rusanovskiy Bogdan Vitalievich, KNS GROUP Limited Liability Company, d. 15, str. 15, Moscow, 123376, Russian Federation, e-mail: a.mordyga@yadro.com;
 Silantiev Alexander Mikhailovich, National Research University of Electronic Technology, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: silantiev@org.miet.ru;
 Kalyonov Alexander Dmitrievich, National Research University of Electronic Technology, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: e-mail: kalyonov.alex@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМ НА ОСНОВЕ КМОП КНИ-ТЕХНОЛОГИИ «90 НМ» ОТ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ТРАНЗИСТОРОВ

На основе электромагнитного моделирования исследованы различные топологии межсоединений транзисторов, реализованных в нижних слоях металлизации и поликремния КНИ-технологии с проектными нормами 90 нм. Целью работы являлась оптимизация конструкций межсоединений транзисторов для минимизации потерь и последующего включения полученных данных в параметризованные ячейки комплекта средств проектирования. В результате анализа выявлены характерные особенности ослабления коэффициента передачи в структурах, предназначенных для усилительных и переключательных транзисторов с различными вариантами реализации межсоединений.

Ключевые слова: КМОП, КНИ, BEOL, FEOL, СВЧ, межсоединения.

Сведения об авторе:

Мошаров Алексей Андреевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, e-mail: amosharov@niime.ru;

Баранов Глеб Владимирович, кандидат физико-математических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, ООО «НИИМЭ-Микродизайн», Московский физико-технический институт, e-mail: gbaranov@niime.ru;

Гусев Сергей Сергеевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: sgusev@niime.ru;

Нуштаев Алексей Владимирович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: anushtaev@niime.ru;

Котляров Евгений Юрьевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1; ФГОУ высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, 1, e-mail: ekotlyarov@niime.ru;

Панасенко Петр Васильевич, доктор технических наук, профессор, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, e-mail: ppanasenko@niime.ru

ANALYSIS OF HIGH FREQUENCY CHARACTERISTICS DEPENDENCE OF 90NM SOI CMOS TECHNOLOGY BASED CIRCUITS ON DESIGN PARAMETERS OF TRANSISTOR INTERCONNECTS

Based on electromagnetic modeling, various interconnection layouts for transistors implemented in the lower metallization and polysilicon layers of SOI 90 nm technology were investigated. The purpose of this work was to optimize transistor interconnect designs to minimize losses and then include the obtained data in parameterized cells of the design kit. As a result, characteristic features of transmission coefficient attenuation in structures designed for amplification and switching transistors with various interconnections were identified.

Keywords: CMOS, SOI, RF, MMIC, FEOL, BEOL, FET interconnects.

Data of author:

Mosharov Alexey Andreevich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 6/1 Akademika Valieva str., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: amosharov@niime.ru;

Baranov Gleb Vladimirovich, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, "Molecular Electronics Research Institute", 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, "Meri-Microdesign" limited liability company, Moscow Institute of Physics and Technology, e-mail: gbaranov@niime.ru;

Gusev Sergey Sergeevich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: sgusev@niime.ru;

Nushtaev Alexey Vladimirovich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: anushtaev@niime.ru;

Kotlyarov Evgeny Yurievich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460; National research university "Moscow institute of electronic technology", 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 1, e-mail: ekotlyarov@niime.ru;

Panasenko Petr Vasilievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: ppanasenko@niime.ru

ОСОБЕННОСТИ ВСТРАИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ В КМОП-ТЕХНОЛОГИЮ

В обзоре представлен комплексный анализ конструктивно-технологических особенностей интеграции различных типов энергонезависимой памяти в технологический базис КМОП СБИС. Исследованы фундаментальные принципы функционирования и структурные характеристики наиболее распространенных архитектур энергонезависимой памяти: FLASH, EEPROM, SONOS, FeRAM, MRAM и резистивной (ReRAM, PCM) памяти. Детально рассмотрен базовый маршрут изготовления субмикронных КМОП СБИС с разделением на этапы FEOL и BEOL. На основе анализа современной научно-технической литературы выявлены ключевые проблемы и технологические ограничения при встраивании каждого типа памяти, включая термическую несовместимость, материаловедческие аспекты, необходимость введения дополнительных фотолитографических операций и модификацию существующих технологических процессов. Систематизированы современные методы преодоления указанных ограничений, в частности, применение низкотемпературных методов осаждения, оптимизация термических режимов, использование барьерных слоёв и специальных архитектурных решений. Представленные результаты имеют существенное значение для разработки новых технологических маршрутов и оптимизации существующих процессов изготовления интегральных схем с встроенной энергонезависимой памятью.

Ключевые слова: ЭНП, КМОП, энергонезависимая память, ОЗУ.

Сведения об авторах:

Сорокин Дмитрий Владимирович, НПО «Институт нанотехнологий микроэлектроники», г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16А, корп. 11, 115487, г. Москва, e-mail: dbmoksor@gmail.com;

Шелепин Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, НПО «Институт нанотехнологий микроэлектроники», г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16А, корп. 11, e-mail: shelepin.n@inme-ras.ru

FEATURES OF EMBEDDING NON-VOLATILE MEMORY ELEMENTS IN CMOS TECHNOLOGY

This review article provides a comprehensive analysis of the structural and technological aspects of integrating various types of non-volatile memory into CMOS VLSI technology. It examines the fundamental operating principles and structural characteristics of the most widely used non-volatile memory architectures, including FLASH, EEPROM, SONOS, FeRAM, MRAM, and resistive memory (ReRAM, PCM). The paper also presents a detailed breakdown of the submicron CMOS VLSI fabrication process, distinguishing between the FEOL and BEOL stages. Based on an extensive review of current scientific and technical literature, the study identifies key challenges and technological constraints in embedding each type of memory, such as thermal incompatibility, material limitations, the need for additional photolithographic steps, and modifications to existing fabrication processes. The article systematizes modern strategies for overcoming these barriers, including low-temperature deposition techniques, optimized thermal processing, barrier layer implementation, and specialized architectural solutions. These findings contribute to the development of new fabrication approaches and the refinement of existing processes for integrating non-volatile memory into advanced semiconductor devices.

Keywords: NVM, CMOS, non-volatile memory, RAM.

Data of author:

Sorokin Dmitry Vladimirovich, Institute of Nanotechnology of Microelectronics, Moscow, Nagatinskaya str., 16A, building 11, 115487, e-mail: dbmoksor@gmail.com;

Shelepin Nikolay Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Nanotechnology of Microelectronics, Moscow, Nagatinskaya str., 16A, building 11, e-mail: shelepin.n@inme-ras.ru

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ СИСТЕМЫ $(1-x)\text{BaTiO}_3 \cdot x\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, $x = 0-0.10$ С ДОБАВКАМИ ЛЕГКОПЛАВКИХ КОМПОНЕНТОВ $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ И $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

С целью разработки новых диэлектрических конденсаторных материалов на основе титаната бария BaTiO_3 (BT) с повышенной термостабильностью диэлектрической проницаемости ϵ и пониженной температурой спекания (T_s) керамики были синтезированы керамические образцы системы $(1-x)\text{BT} \cdot x\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ ($(1-x)\text{BT} \cdot x\text{PFW}$), $x = 0-0.15$, а также образцы этой системы с добавками легкоплавких стеклообразующих компонент $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ (PGO) и $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (NBO) – $(1-x)\text{BT} \cdot x\text{PFW} + y \text{ мас.}\% \text{ PGO} + z \text{ мас.}\% \text{ NBO}$, $x = 0-0.10$, $y, z = 0-8$. Выполненный рентгенофазовый анализ показал, что преобладающей фазой в синтезированных образцах являются твердые растворы со структурой перовскита. Изучены температурно-частотные зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon(T, f)$ и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan\delta(T, f)$, установлено, что добавки PFW, PGO, NBO смещают точку Кюри T_C в область комнатной температуры, вызывают размытие пика на зависимости $\epsilon(T, f)$ и повышение термостабильности ϵ , они понижают T_s до 1300 °C (PFW), 1100 °C (PFW + PGO), 960 °C (PFW + PGO + NBO). Керамика с $x = 0.085$, $y = 5$, $z = 3$ характеризуется в области комнатной температуры высокой ϵ (>1000), низким $\tan\delta$ (< 0.02), высокой термостабильностью ($\Delta\epsilon/\epsilon < 15\%$), а также сравнительно низкой T_s (960 °C) что делает ее перспективной для создания многослойных высокоемкостных конденсаторов со сравнительно дешевыми межслойными электродами с легкоплавкими внутренними электродами типа Ag или сплавов Ag/Pd.

Ключевые слова: конденсаторная керамика, MLCCs, система BaTiO_3 – $\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, легкоплавкие стеклообразующие добавки, рентгенофазовый анализ, диэлектрические свойства.

Сведения об авторах:

Федулов Дмитрий Юрьевич; аспирант Института перспективных технологий и промышленного программирования РТУ МИРЭА,
e-mail: d.feduloff@yandex.ru;

Каменцев Константин Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела НИИ материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА,
e-mail: valkame@yandex.ru;

Бущ Александр Андреевич, доктор технических наук, профессор, директор НИИ материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА,
e-mail: aabush@yandex.ru

DIELECTRIC PROPERTIES OF CERAMIC SAMPLES OF THE $(1-x)\text{BaTiO}_3 \cdot x\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, $x = 0-0.10$ SYSTEM WITH ADDITIVES OF LOW-MELTING COMPONENTS $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ AND $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

Ceramic samples of the $(1-x)\text{BT} \cdot x\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ ($(1-x)\text{BT} \cdot x\text{PFW}$), $x = 0-0.15$ system as well as samples of this system with additives of low-melting glass-forming components $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ (PGO) and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (NBO) – $(1-x)\text{BT} \cdot x\text{PFW} + y \text{ wt.}\% \text{ PGO} + z \text{ wt.}\% \text{ NBO}$, $x = 0-0.10$, $y, z = 0-8$ were synthesized in order to develop new dielectric capacitor materials based on barium titanate BaTiO_3 (BT) with increased thermal stability of dielectric permittivity ϵ and reduced sintering temperature (T_s) of ceramics. X-ray diffraction phase analysis showed that the predominant phase in the synthesized samples are solid solutions with a perovskite structure. The temperature-frequency dependences of the dielectric permittivity $\epsilon(T, f)$ and the tangent of the dielectric loss angle $\tan\delta(T, f)$ were studied, and it was found that the additives PFW, PGO, and NBO shift the Curie point T_C to room temperature, causing a blurring of the peak on the dependence $\epsilon(T, f)$ and an increase in thermal stability ϵ , they lower the T_s to 1300 °C (PFW), 1100 °C (PFW + PGO), 960 °C (PFW + PGO + NBO). Ceramics with $x = 0.085$, $y = 5$, and $z = 3$ are characterized in the room temperature range by high ϵ (> 1000), low $\tan\delta$ (< 0.02), and high thermal stability ($\Delta\epsilon/\epsilon < 15\%$), as well as a relatively low T_s (960 °C), which makes it promising for creating multilayer high-capacity capacitors with relatively cheap interlayer electrodes with low-melting internal electrodes of the Ag type or Ag/Pd alloys.

Keywords: capacitor ceramics, MLCCs, BaTiO_3 – $\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ system, low-melting glass-forming additives, X-ray phase analysis, dielectric properties.

Data of authors:

Fedulov Dmitry Yurievich, Postgraduate student of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA,
e-mail: d.feduloff@yandex.ru;

Kamentsev Konstantin Evgenievich, candidate of Technical Sciences, Head of the Department of the Scientific Research Institute of Solid State Electronics Materials RTU MIREA, e-mail: valkame@yandex.ru;

Bush Alexander Andreevich, doctor of Technical Sciences, professor, director of the Research Institute of Solid-State Electronics Materials, MIREA – Russian Technological University, e-mail: aabush@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПОЗНАВАЕМОСТИ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ПО СТОРОННИМ КАНАЛАМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИ ОПЕРАЦИИ ЗАПИСИ В РЕГИСТР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛИС

Исследованы физические принципы источников энергопотребления в современных цифровых КМОП-схемах. Разработана методика детектирования всплесков энергопотребления микросхемы в процессе операции записи данных в регистр с использованием ПЛИС. Рассмотрены различные подходы программной обработки результатов измерений с целью точного определения соответствия между группами кривых для различных весов Хэмминга микросхемы.

Ключевые слова: ПЛИС, регистр, анализ энергопотребления, оценка распознаваемости данных, вес Хэмминга, дистанция Хэмминга.

Сведения об авторах:

Алексеев Валерий Дмитриевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: valseev@niime.ru;

Тишин Александр Сергеевич, кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: atishin@niime.ru;

Михайлов Виктор Юрьевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: vmikhailov@niime.ru

AN INVESTIGATION OF INFORMATION LEAKAGE RECOGNIZABILITY OF REGISTER WRITE OPERATION THROUGH SIDE-CHANNEL POWER CHANNELS USING FPGA

Physical principles of power consumption sources in modern digital CMOS circuits are investigated. The technique of detecting edges of chip power consumption during the process of data write operation to the FPGA register is developed. Various approaches of software processing of measurement results are considered in order to accurately determine the correspondence between groups of curves for different Hamming weights in chip.

Keywords: FPGA, register, power analysis, disclosure of data, Hamming weight, Hamming distance.

Data of authors:

Alekseev Valery Dmitrievich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: valseev@niime.ru;

Tishin Alexander Sergeevich – PhD in Engineering sciences, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: atishin@niime.ru;

Mikhailov Victor Yur'evich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: vmikhailov@niime.ru

МОДЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИБРИДНЫХ ОРГАНОСИЛИКАТНЫХ ПЛЁНОК

При помощи моделирования из первых принципов и аналитических расчетов было установлено, как концентрации терминальных метильных и бензольных мостиковых групп влияют на механические и диэлектрические характеристики органосиликатного диэлектрика.

Ключевые слова: low-k, диэлектрическая постоянная, моделирование из первых принципов, мостиковые группы, терминальные группы.

Сведения об авторах:

Цепкин Михаил Викторович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»; Российский Технологический Университет «МИРЭА»; Научно-образовательный центр «Технологический центр», Московский физико-технический институт; Москва, Зеленоград, Академика Валиева 6/1; e-mail: mtsepkin@niime.ru;
Резванов Аскар Анварович, кандидат физико-математических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»; Российский Технологический Университет «МИРЭА»; Научно-образовательный центр «Технологический центр», Московский физико-технический институт; Москва, Зеленоград, Академика Валиева 6/1; e-mail: arezvanov@niime.ru

MODELING AND ANALYTICAL STUDY OF ELECTROMECHANICAL PROPERTIES OF HYBRID ORGANOSILICATE FILMS

Through first-principles modeling and analytical calculations, information on the influence of the concentrations of terminal methyl and benzene bridging groups in the organosilicate dielectric on the mechanical and dielectric characteristics was obtained.

Keywords: low-k, dielectric constant, ab initio modeling, bridging groups, terminal groups.

Data of authors:

Tsepkin Mikhail Viktorovich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company,
Russian Technological University "MIREA", Research and Educational Center "Technological Center", Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: mtsepkin@niime.ru;
Rezvanov Askar Anvarovich, Ph.D, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Russian Technological University "MIREA", Research and Educational Center "Technological Center", Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: arezvanov@niime.ru

**ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3.
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ©**

Перерегистрирован в Федеральной службе
по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций
14 августа 2013 г., **ПИ № ФС77-55092**.

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.
Подписано в печать 22.08.2025.
Дата выхода в свет 31.08.2025.

Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
(Типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Заказ № 536
Тираж 300 экз. Цена договорная.

© При перепечатке ссылка на журнал
«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3.
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения
авторов статей. Рукописи рецензируются, но не возвра-
щаются. Срок рассмотрения рукописей – 5 недель.

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
E-mail: info@naukapublishers.ru
<https://naukapublishers.ru>
<https://naukabooks.ru>