



# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

## **СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 2(182) 2021

---

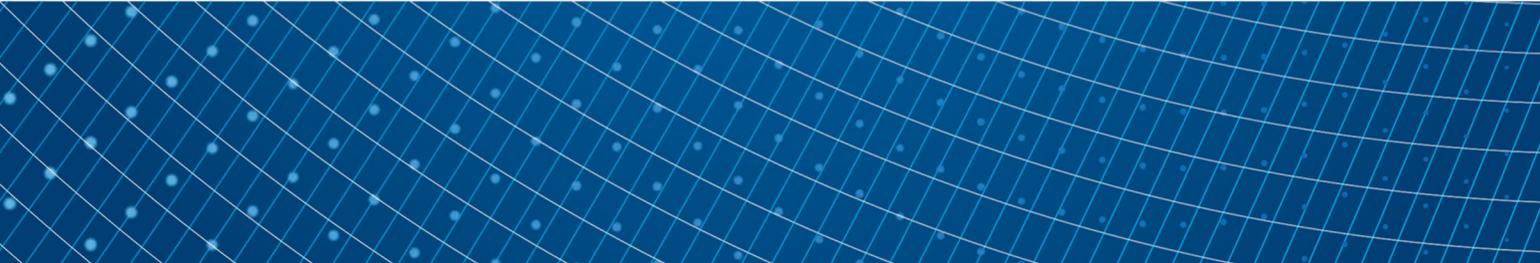
# **ELECTRONIC ENGINEERING**

## **SERIES 3 MICROELECTRONICS**

Scientific & Technical Journal

Выпуск 2(182) 2021

Москва, 2021



**«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.****Серия 3.****МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»****Редакционный совет****Главный редактор****Красников Геннадий Яковлевич,**  
д. т. н., академик РАН**Члены редакционного совета****Асеев Александр Леонидович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

**Vaklanov M. R.,** Dr. Sc.**Бетелин Владимир Борисович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

**Бокарев Валерий Павлович,**

ответственный секретарь, д. т. н.

**Бугаев Александр Степанович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

**Быков Виктор Александрович,**

д. т. н.

**Галиев Галиб Бариевич,** д. ф.-м. н.**Горбачевич Александр Алексеевич,**

д. ф.-м. н., академик РАН

**Горнев Евгений Сергеевич,**

зам. главного редактора,

д. т. н., член-корреспондент РАН

**Грибов Борис Георгиевич,** д. х. н.,

член-корреспондент РАН

**Зайцев Николай Алексеевич,**

д. т. н.

**Ким Александр Киирович,** к. т. н.**Критенко Михаил Иванович,** к. т. н.**Maev Roman Gr.,** Dr. Sc.**Петричкович Ярослав Ярославович,**

д. т. н.

**Сигов Александр Сергеевич,**

д. ф.-м. н., академик РАН

**Стемпковский Александр****Леонидович,** д. т. н., академик РАН**Чаплыгин Юрий Александрович,**

д. т. н., академик РАН

**Шелепин Николай Алексеевич,**

зам. главного редактора, д. т. н.

**Эннс Виктор Иванович,** к. 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 издается с 1965 года

**Учредитель**АО «Научно-исследовательский  
институт молекулярной  
электроники»**Слово редактора** ..... 4**Разработка и конструирование****В.В. Лосев, Л.В. Недашковский, Р.С. Шабардин**Методика проектирования тракта гетеродина СВЧ  
квадратурных модуляторов и демодуляторов с регулируемым  
разбалансом ..... 5**Процессы и технология****В.Ю. Васильев**Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида кремния  
для микро- и нанoeлектроники.Часть 5. Особенности роста пленок в соответствии с моделями  
гидроксила на кремнеземе ..... 10**Л.А. Щигорев**Развитие устройств встроенного саморемонта блоков  
статической оперативной памяти ..... 17**Свойства материалов****Н.А. Захаров, В.П. Бокарев, Е.В. Шелехов, В.В. Матвеев,****А.Д. Алиев, М.Р. Киселев, Е.М. Коваль, Т.В. Захарова,****А.П. Нечипоренко**Композиционные материалы. Гидроксипатит кальция -  
углеволокно ..... 25**Математическое моделирование****Е.С. Горнев, И.В. Матюшкин, И.Ф. Калимова**Сравнительный анализ моделей проводимости в мемристивных  
структурах на основе тонких пленок нитрида кремния ..... 33**В.Ю. Михайлов, Е.Ю. Котляров, А.В. Нуйкин**

Изменения технологии NB-IoT в Release 16 и Release 17 ..... 49

**В.В. Бардушкин, Е.С. Горнев, И.В. Лавров,****Ю.И. Шиляева, В.Б. Яковлев**Эффективные упругие характеристики кремниевых  
влагонасыщенных мезопористых структур вблизи точки фазового  
перехода при наличии пространственного ограничения ..... 62**Аннотации** ..... 68

**“ELECTRONIC ENGINEERING.  
Series 3.  
MICROELECTRONICS”**

**Editorial Council  
Chief Editor**

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

**The Members of Editorial Council**

**Aseev A. L.**, Sc. D.,

Full Member of the RAS

**Baklanov M. R.**, Sc. D.,

**Betelin V. B.**, Sc. D., Full

Member of the RAS

**Bokarev V. P.**, Sc. D.,

Responsible Secretary

**Bugaev A. S.**, Sc. D.,

Full Member of the RAS

**Bykov V. A.**, Sc. D.

**Galiev G. B.**, Sc. D.

**Gorbatsevich A. A.**, Sc. D.,

Full Member of the RAS

**Gornev E. S.**, Sc. D.,

Corresponding Member

of the RAS, Deputy Chief Editor

**Gribov B. G.**, Sc. D.,

Corresponding Member of the RAS

**Zaitsev N. A.**, Sc. D.

**Kim A. K.**, Ph. D.

**Kritenko M. I.**, Ph. D.

**Maev Roman Gr.**, Sc. D.

**Petrichkovich Ya. Ya.**, Sc. D.

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

Full Member of the RAS

**Stempkovskiy A. L.**, Sc. D.,

Full Member of the RAS

**Chaplygin Yu. A.**, Sc. D.,

Full Member of the RAS

**Shelepin N. A.**, Sc. D.,

Deputy Chief Editor

**Enns V. I.**, Ph. 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**

**V.V. Losev, L.V. Nedashkovskiy, R.S. Shabardin**

Design procedure of RF quadrature modulators and demodulators  
with controllable unbalance lo-path ..... 5

**Processes and Technology**

**V.Yu. Vasilyev**

Atomic layer deposition of silicon dioxide thin films for micro-  
and nanoelectronics.

Part 5. Film growth in light of the models of surface hydroxyl  
on silica ..... 10

**L.A. Shchigorev**

SRAM built-in self-repair devices evolution ..... 17

**Properties of Materials**

**N.A. Zakharov, V.P. Bokarev, E.V. Sheleckov,**

**V.V. Matveev, A.D. Aliev, M.R. Kiselev, E.M. Koval,**

**T.V. Zakharova, A.P. Nechiporenko**

Composite materials calcium hydroxyapatite – carbon fibers ..... 25

**Mathematical simulation**

**E.S. Gornev, I.V. Matyushkin, I.F. Kalimova**

Comparative analysis of conductivity models in memristive structures  
based on thin films of silicon nitride ..... 33

**V.Y. Mikhailov, E.Y. Kotlyarov, A.V. Nuykin**

NB-IoT technology changes in Release 16 and Release 17 ..... 49

**V.V. Bardushkin, E.S. Gornev, I.V. Lavrov,**

**Yu.I. Shilyaeva, V.B. Yakovlev**

Effective elastic characteristics of moisture-saturated mesoporous  
silicon near the confinement phase transition ..... 62

**Abstracts** ..... 68

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 №1969 by the all-Russian attestation  
Commission (НАС)

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед вами очередной 182-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

В нашем журнале публикуются статьи ведущих специалистов, в том числе подписчиков журнала «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника». Став подписчиком журнала, вы сможете поделиться опытом организации производства, внедрения инновационных технологий, рассказать о новых разработках в области микроэлектроники, компьютерной техники. Статьи в нашем журнале являются своего рода рекламой продукции ваших предприятий.

В данном номере внимание читателей журнала привлекут тематические материалы, опубликованные под рубриками: «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Математическое моделирование».

Выпуск журнала представлен семью оригинальными статьями, посвященными результатам актуальных научных исследований.

Номер открывается разделом «Разработка и конструирование», в котором приведена методика проектирования, являющаяся обобщением существующего опыта проектирования трактов гетеродина для квадратурных модуляторов и демодуляторов.

В разделе «Процессы и технология» автором исследованы особенности роста пленок в процессах атомно-слоевого осаждения тонких пленок диоксида кремния для микро- и нанoeлектроники, а в следующей работе прослежено развитие устройств встроенного саморемонта блоков статической оперативной памяти.

В разделе «Свойства материалов» авторами рассмотрены результаты синтеза композиционных материалов на основе углеволокна и биосовместимого гидроксиапатита кальция  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  в ходе осаждения из водных растворов в системе



$\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-углеволокно-H}_2\text{O}$ . Определено влияние состава на морфологию нанокристаллов гидроксиапатита и их растворимость в составе композиционного материала.

В заключительном разделе «Математическое моделирование» приведен обзор современных работ по моделированию свойств мемристорных структур на основе нитрида кремния. Кратко рассмотрены физические принципы, положенные в основу семи используемых разными авторами моделей, и сделан вывод о необходимости разработки синтетической модели, валидной на всех участках петли гистерезиса вольтамперной характеристики. Также в разделе рассмотрены стандартизированные 3GPP изменения технологии NB-IoT в сетях 4G/5G, приведенные в Release 16 и Release 17. Приведен расчет потерь радиолинии спутник – мобильная станция в рамках реализации спутникового сегмента 5G для Интернета вещей. Кроме того, в данном блоке решается задача моделирования эффективных упругих характеристик мезопористых структур на основе кремния с адсорбированной водой, замерзшей в условиях пространственного ограничения.

Приглашаем всех заинтересованных читателей к сотрудничеству!

С уважением,  
главный редактор журнала,  
академик РАН,

Г.Я. Красников

### МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАКТА ГЕТЕРОДИНА СВЧ КВАДРАТУРНЫХ МОДУЛЯТОРОВ И ДЕМОДУЛЯТОРОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ РАЗБАЛАНСОМ

В работе приведена методика проектирования, обобщающая накопленный опыт проектирования трактов гетеродина для квадратурных модуляторов и демодуляторов. В число основных этапов методики входят: выбор архитектуры расщепителя фазы; проектирование и настройка полифазного фильтра или делителя частоты; проектирование схемы регулирования фазы; проектирование усилителей, настройка АЧХ, выходной амплитуды и уровня сигнала гетеродина; проектирование ЦАП для регулирования разбаланса фаз и амплитуд, проектирование топологии.

**Ключевые слова:** квадратурный модулятор, квадратурный демодулятор, тракт гетеродина, СВЧ.

#### Сведения об авторах:

Лосев Владимир Вячеславович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1, e-mail: dsd@miee.ru

Недашковский Леонид Владимирович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1, e-mail: leo\_ned@mail.ru

Шабардин Руслан Сергеевич, кандидат технических наук, Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», 125183, г. Москва, проезд Черепановых, д. 54, e-mail: shabardin@mri-progress.ru

### АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.

#### Часть 5. Особенности роста пленок в соответствии с моделями гидроксила на кремнеземе

В пятой части обзора проанализированы модели поверхностного гидроксила на кремнеземе с целью оценки их применимости для качественного объяснения выделенных температурных зависимостей роста и плотности ТПДК при их получении методами АСО.

**Ключевые слова:** диоксид кремния, тонкая пленка, атомно-слоевое осаждение, модели гидроксила на кремнеземе, температурные зависимости, скорость осаждения, плотность пленок.

#### Сведения об авторе:

Васильев Владислав Юрьевич, доктор химических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета, Заместитель генерального директора ООО «СИБИС», 630049, г. Новосибирск, а/я 68, e-mail: vasilev@corp.nstu.ru

### DESIGN PROCEDURE OF RF QUADRATURE MODULATORS AND DEMODULATORS WITH CONTROLLABLE UNBALANCE LO-PATH

The paper presents a design procedure that is a generalization of the existing experience in design local oscillator paths for quadrature modulators and demodulators. The main stages of the procedure are the choice of the phase splitter architecture; design and adjustment of a polyphase filter or frequency divider; phase control circuit design; amplifiers design, tuning the frequency response, output amplitude and level of the local oscillator signal; DACs design for phase and amplitude unbalance control, layout design.

**Keywords:** quadrature modulator, quadrature demodulator, LO-path, RF.

#### Data of authors:

Losev Vladimir Vyacheslavovich, Doctor of technical science, Associate Professor, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: dsd@miee.ru

Nedashkovskiy Leonid Vladimirovich, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: leo\_ned@mail.ru

Shabardin Ruslan Sergeevich, candidate of Engineering Sciences, "Progress Microelectronics Research Institute" Joint Stock Company; Bld. 54, Cherepanovyykh Ave., Moscow, Russia, 125183, e-mail: shabardin@mri-progress.ru

### ATOMIC LAYER DEPOSITION OF SILICON DIOXIDE THIN FILMS FOR MICRO- AND NANOELECTRONICS.

#### Part 5. Film growth in light of the models of surface hydroxyl on silica

In the fifth part of the review, the models of surface hydroxyl on silica are analyzed in order to assess their applicability for a qualitative explanation of the temperature dependences of the growth and density of silicon dioxide thin films obtained by ALD methods.

**Keywords:** silicon dioxide, thin film, atomic layer deposition, hydroxyl models on silica, temperature dependence, deposition rate, film density.

#### Data of the author:

Vasilev Vladislav Yurievich, doctor of chemistry, Professor of Novosibirsk state technical university, Deputy Director General SibIS LLC, Novosibirsk, Russian Federation, PO Box 68 Novosibirsk, 630049, e-mail: vasilev@corp.nstu.ru

### РАЗВИТИЕ УСТРОЙСТВ ВСТРОЕННОГО САМОРЕМОНТА БЛОКОВ СТАТИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Предложена новая структура анализатора ремонта, хранящая информацию о неработоспособных элементах статической оперативной памяти в виде вектора ошибки. Проведено сравнение технологических характеристик устройств встроенного саморемонта памяти, реализованных на базе различных анализаторов ремонта. Показано преимущество предложенной структуры над известными ранее реализациями, заключающееся в сокращении длин критических путей, а также площади, занимаемой на кристалле.

**Ключевые слова:** статическое оперативное запоминающее устройство (СОЗУ), резервирование, резервные столбцы, устройство встроенного саморемонта памяти (УВСР), устройство встроенного самотестирования памяти (УВСТ), отказоустойчивость, система на кристалле (СнК).

#### Сведения об авторе:

Щигорев Леонид Алексеевич, Закрытое акционерное общество научно-технический центр «Модуль», 125190, г. Москва, 4-я улица 8 Марта, д. 3; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), 115409, Москва, Каширское ш., 31, e-mail: l.shchigorev@module.ru

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ГИДРОКСИАПАТИТ КАЛЬЦИЯ – УГЛЕВОЛОКНО

Синтезированы композиционные материалы (КМ) на основе углеволокна (УВ) и биосовместимого гидроксиапатита кальция  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  (ГА) в ходе осаждения из водных растворов в системе  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-УВ-H}_2\text{O}$ . Определено влияние состава на морфологию нанокристаллов ГА (НКА) и их растворимость в составе КМ ГА/УВ.

**Ключевые слова:** гидроксиапатит, углеволокно, композиты, синтезы, свойства.

#### Сведения об авторах:

Захаров Николай Алексеевич, доктор физико-математических наук, Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, 117907, РФ, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Бокарев Валерий Павлович, доктор технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: vbokarev@niime.ru

Шелехов Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»», 117907, РФ, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Матвеев Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук; Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 117907, РФ, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Алиев Али Джавадович, кандидат физико-математических наук, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 117907, РФ, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Киселев Михаил Романович, кандидат физико-математических наук, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 117907, РФ, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Коваль Елена Михайловна, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 117907, РФ, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: zakharov@igic.ras.ru;

Захарова Татьяна Владимировна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», 127994, РФ, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, д. 9/9, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Нечипоренко Александр Петрович, кандидат технических наук, Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: anechiporenko@niime.ru

### SRAM BUILT-IN SELF-REPAIR DEVICES EVOLUTION

A new structure of the repair analyzer is proposed. It stores information about faulty SRAM elements with the assistance of an error vector. A comparison of the technological characteristics of built-in self-repair devices implemented on the basis of various repair analyzers is made. The advantage of the proposed structure over the previously known realizations is illustrated, which consists in reducing area and timing penalties.

**Keywords:** static random access memory (SRAM), redundancy, redundant columns, built-in self-repair (BISR), built-in self-test (BIST), fault tolerance, system on chip (SoC).

#### Data of the author:

Shchigorev Leonid Alekseevich, Research Centre "Module", 3, 4-ya ulitsa 8 marta, Moscow, 125190; National Research Nuclear University MEPhI Moscow Engineering Physics Institute, 31, Kashirskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 115409, e-mail: l.shchigorev@module.ru

### COMPOSITE MATERIALS CALCIUM HYDROXYAPATITE – CARBON FIBERS

Composite materials (CM) on the base of carbon fibers (CF) and biocompatible calcium hydroxyapatite (HA) in the course of water solution precipitation in system  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-УВ-H}_2\text{O}$  synthesized. The influence of composition on morphology HA nanocrystals (NCHA) and their solubility in CM HA/CF were estimated.

**Keywords:** hydroxyapatite, carbon fibers, composites, synthesis, properties.

#### Data of authors:

Zakharov Nikolay Alekseevich, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, doctor of physical and mathematical Sciences, professor, 31, Leninskii pr., Moscow, Russian Federation, 117907, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Bokarev Valerii Pavlovich, doctor of Technical Sciences, Molecular Electronics Research Institute, Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva street, 6/1, e-mail: vbokarev@mikron.ru

Shelekov Evgenii Vladimirovich, candidate of physical and mathematical Sciences, National University of Science and Technology MISIS, scientist; 31, Leninskii pr., Moscow, Russian Federation, 117907, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Matveev Vladimir Vasilievich, candidate of physical and mathematical Sciences, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, scientist; 31, Leninskii pr., Moscow, Russian Federation, 117907, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Aliiev Ali Dzhavadovich, candidate of physical and mathematical Sciences, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, scientist; 31, Leninskii pr., Moscow, Russian Federation, 117907, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Kiselev Michail Romanovich, candidate of physical and mathematical Sciences, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, scientist; 31, Leninskii pr., Moscow, Russian Federation, 117907, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Koval Elena Mikhailovna, Scientist, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, scientist; 31, Leninskii pr., Moscow, Russian Federation, 117907, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Zakharova Tatiana Vladimirovna, candidate of physical and mathematical Sciences, Russian University of transport (MIIT), 9, Obrastsova st., Moscow, Russian Federation, 127994, e-mail: zakharov@igic.ras.ru

Nechiporenko Aleksandr Petrovich, candidate of engineering Sciences, Molecular Electronics Research Institute, Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva street, 6/1, e-mail: anechiporenko@niime.ru

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОВОДИМОСТИ В МЕМРИСТИВНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ

Нитрид кремния, включая нестехиометрический  $\text{SiN}_x$  ( $x < 4/3$ ), остается базовым материалом в наноэлектронике, что делает актуальным исследование мемристоров на его основе. Нами проведен обзор современных работ в этой области с акцентом на выявленные их авторами механизмы и модели проводимости; проведена систематизация в табличной форме. Кратко рассмотрены физические принципы, положенные в основу семи используемых разными авторами моделей, и сделан вывод о необходимости разработки синтетической модели, валидной на всех участках петли гистерезиса вольтамперной характеристики. По сравнению с мемристорами на основе оксидов переходных металлов такая синтетическая модель обязательно должна учитывать: 1) прыжки носителей заряда между ловушками; 2) процессы зарядки/перезарядки ловушек; 3) изменения локальных характеристик (подвижность, диэлектрическая проницаемость, температура) при электрополовом воздействии.

**Ключевые слова:** мемристор, МДМ-структура, нитрид кремния, механизм проводимости, математические модели.

#### Сведения об авторах:

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6, стр. 1, e-mail: egornev@niime.ru

Матюшкин Игорь Валерьевич, кандидат физико-математических наук; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6, стр. 1, e-mail: imatushkin@mikron.ru

Калимова Ирина Фанилевна, студент 6-го курса магистратуры; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6, стр. 1, e-mail: ikalimova@niime.ru

### ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ NB-IoT В RELEASE 16 И RELEASE 17

В статье рассмотрены стандартизированные Партнерским проектом 3GPP изменения технологии NB-IoT в сетях 4G/5G, приведенные в Release 16 и Release 17. Приведен расчет потерь радиосвязи «спутник–мобильная станция» в рамках реализации спутникового сегмента 5G для Интернета вещей.

**Ключевые слова:** интернет вещей, NB-IoT, 5G, LTE, 3GPP, беспроводная связь.

#### Сведения об авторе:

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

Котляров Евгений Юрьевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: ekotlyarov@niime.ru

Нуйкин Андрей Валерьевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: anuykin@niime.ru

### COMPARATIVE ANALYSIS OF CONDUCTIVITY MODELS IN MEMRISTIVE STRUCTURES BASED ON THIN FILMS OF SILICON NITRIDE

Silicon nitride, including the non-stoichiometric  $\text{SiN}_x$  ( $x < 4/3$ ), remains the basic material in nanoelectronics, which makes the study of memristors based on it relevant. We have reviewed the current works in this field with an emphasis on the mechanisms and models of conductivity identified by other authors; we have systematized them in a tabular form. The physical principles underlying these seven models used by researchers are briefly considered, and it is concluded that it is necessary to develop a synthetic model that is valid for all regions of the hysteresis loop of the current-voltage characteristic. In comparison with memristors based on transition metal oxides, such a synthetic model must necessarily take into account: 1) jumps of charge carriers between traps; 2) processes of charging/recharging of traps; 3) changes in local characteristics (mobility, permittivity, temperature) under electropole action.

**Keywords:** memristor, MDM structure, silicon nitride, conduction mechanism, mathematical models.

#### Data of authors:

Gornev Evgeny Sergeevich, Corresponding Member of RAS, doctor of Engineering Sciences, professor, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva ulitsa, 6/1, e-mail: egornev@niime.ru

Matushkin Igor Valerevich, candidate of Physico-Mathematical Sciences, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, «Molecular Electronic Research Institute» Stock Company, 6/1, Akademika Valieva Ulitsa, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: imatushkin@mikron.ru

Kalimova Irina Fanilevna, 6th year graduate student; Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) Moscow region, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9; «Molecular Electronic Research Institute» Stock Company, 6/1, Akademika Valieva Ulitsa, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: ikalimova@niime.ru

### NB-IoT TECHNOLOGY CHANGES IN RELEASE 16 AND RELEASE 17

The article discusses the NB-IoT technologies standardized by the Partnership Project 3GPP technology changes in 4G/5G networks, given in Release 16 and Release 17. The radio link loss calculation from a satellite to a mobile station as part of the implementation of the 5G satellite segment for the Internet of Things is presented.

**Keywords:** internet of things, NB-IoT, 5G, LTE, 3GPP, wireless communication.

#### Data of authors:

Mikhailov Victor Y., «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow 124460, Russia, e-mail: vmikhaylov@niime.ru

Kotlyarov Evgeny Y., «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow 124460, Russia, e-mail: ekotlyarov@niime.ru

Nuykin Andrey V., «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow 124460, Russia, e-mail: anuykin@niime.ru

**ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ МЕЗОПОРИСТЫХ СТРУКТУР ВБЛИЗИ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПРИ НАЛИЧИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОГРАНИЧЕНИЯ**

Решается задача моделирования эффективных упругих характеристик мезопористых структур на основе кремния с адсорбированной водой, замерзшей в условиях пространственного ограничения. Построена теоретическая модель, учитывающая влияние на значения эффективных модулей упругости водонасыщенных мезопористых материалов наличия на поверхности пор естественного слоя диоксида кремния, структуры среды (отношения толщины оксидного слоя к радиусу нитевидной поры, а также ориентации пор в пространстве кремниевой мембраны) и объемного содержания элементов неоднородности. Проведены численные модельные расчеты компонент тензора эффективных модулей упругости исследуемых водонасыщенных мезопористых структур. Моделирование показало, что увеличение характерного размера включений (отношение толщины оксидного слоя к радиусу поры) приводит к уменьшению значений компонент тензора эффективных модулей упругости по закону, близкому к линейному.

**Ключевые слова:** пористый кремний, диоксид кремния, деионизированная вода, лед, матричный композит, эффективные модули упругости, моделирование.

**Сведения об авторах:**

*Бардушкин Владимир Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедр «Высшая математика № 2» и «Системная среда качества» МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: bardushkin@mail.ru*

*Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, стр. 12, e-mail: egornev@niime.ru*

*Лавров Игорь Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: iglavr@mail.ru*

*Шилиева Юлия Игоревна, кандидат химических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: shyliaeva@gmail.com*

*Яковлев Виктор Борисович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, начальник отдела Института нанотехнологий микроэлектроники РАН, профессор «Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники»», e-mail: yakvb@mail.ru*

**EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF MOISTURE-SATURATED MESOPOROUS SILICON NEAR THE CONFINEMENT PHASE TRANSITION**

The problem of modeling the effective elastic characteristics of mesoporous structures based on silicon with adsorbed water frozen under confinement is solved. A theoretical model is developed that takes into account the effect of the native silicon dioxide layer on the pore surface, the medium structure (the ratio of the oxide layer thickness to the filamentary pore radius, as well as the spatial orientation of the pores in the silicon membrane, and the volumetric content of inhomogeneous elements on the effective elastic moduli of water-saturated mesoporous materials. Numerical model calculations of the components of the effective elastic moduli tensor of investigated water-saturated mesoporous structures are carried out. Modeling showed that an increase in the characteristic size of inclusions (the ratio of the oxide layer thickness to the pore radius) leads to a decrease in the values of the components of the effective elastic moduli tensor according to a law close to linear.

**Keywords:** porous silicon, silica, deionized water, ice, matrix composite, effective elastic modules, modeling.

**Data of authors:**

*Bardushkin Vladimir Valentinovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, docent, Professor departments of «Higher mathematics No. 2» and «System environment» quality MIET, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: bardushkin@mail.ru*

*Gornev Evgeny Sergeevich, Corresponding Member of RAS, doctor of Engineering Sciences, professor, Molecular Electronics Research Institute, Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva ulitsa, 12/1, e-mail: egornev@niime.ru*

*Lavrov Igor Victorovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: shyliaeva@gmail.com*

*Shyliaeva Yulia Igorevna, candidate of chemical Sciences, associate Professor, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: shyliaeva@gmail.com*

*Yakovlev Viktor Borisovich, doctor of physico-mathematical Sciences, Professor Russian Academy of Sciences, head of Department of the Institute of nanotechnology of microelectronics of the RAS, Professor, «National Research University of Electronic Technology», e-mail: yakvb@mail.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 30.07.2021.

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»  
(Типография «Наука»)  
121099, Москва, Шубинский пер., 6  
Заказ № 22  
Тираж 500 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 возвращаются. Срок рассмотрения рукописей – 5 недель.

**ИЗДАТЕЛЬ**

ФГУП «Издательство «Наука»  
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90  
E-mail: [info@naukaran.com](mailto:info@naukaran.com)  
<https://naukapublishers.ru>  
<https://naukabooks.ru>