

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

## СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 2(190) 2023

---

# ELECTRONIC ENGINEERING

## SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Выпуск 2(190) 2023

Москва, 2023

**«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

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

д. т. н.

**Рощупкин Дмитрий Валентинович,**

д. ф.-м.н., член-корреспондент РАН

**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,** 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 издается с 1965 года

**Учредитель**АО «Научно-исследовательский  
институт молекулярной  
электроники»**Слово редактора** ..... 4**Физические явления****В.В. Бардушкин, И.В. Лавров, В.Б. Яковлев, А.А. Кочетыгов,****А.В. Бардушкин**Напряженно-деформированное состояние в структурах  
por-Si – H<sub>2</sub>O в окрестности точки фазового перехода воды ..... 5**Разработка и конструирование****Е.Ю. Котляров, М.Г. Путря, В.Ю. Михайлов, А.С. Тишин**Исследование времени установки фазового сдвига при работе  
дискретного СВЧ фазовращателя ..... 13**А.Д. Калёнов**Метод проектирования широкополосных дифференциальных  
аттенуаторов ..... 26**Процессы и технология****В.Ю. Киреев, Д.А. Костюков, В.В. Одинокоев**Системы металлизации интегральных микросхем.  
Часть 1. Эволюция систем металлизации в процессе развития  
планарной КМОП технологии ..... 32**А.Д. Калёнов, В.В. Лосев, Л.В. Недашковский, Ю.А. Чаплыгин**Сравнение высокочастотных возможностей отечественных  
КМОП технологий с проектными нормами 90 нм и 180 нм  
на примере проектирования смесительного блока квадратного  
демодулятора ..... 52**A.D. Kalyonov, V.V. Losev, L.V. Nedashkovskiy, Yu.A. Chaplygin**Comparison of high-frequency capabilities of domestic 90 nm  
and 180 nm CMOS technologies on the example of design  
a quadrature demodulator mixing block ..... 57**М.В. Черняев, С.А. Горохов, С.И. Патюков, А.А. Резванов**

Низкотемпературное радикальное ISSG окисление кремния ..... 62

**M.V. Chernyaev, S.A. Gorokhov, S.I. Patyukov, A.A. Rezvanov**

Low-temperature radical ISSG oxidation of silicon ..... 69

**Свойства материалов****К.Б. Тыныштыкбаев**

Энергетика нанокристаллитов пористого кремния ..... 76

**Аннотации** ..... 95

**“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

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

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

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

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

**Roshchupkin D.V.**, Sc. D.

Corresponding Member of the RAS

**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.**, 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

**Physical phenomena**

**V.V. Bardushkin, I.V. Lavrov, V.B. Yakovlev, A.A. Kochetygov,  
A.V. Bardushkin**

Stress-strain condition in por-Si – H<sub>2</sub>O structures near the phase  
transition point of water ..... 5

**Development and designing**

**E.Yu. Kotlyarov, M.G. Putrya, V.Yu. Mikhailov, A.S. Tishin**

Phase shift setting time measurement research during a discrete  
RF phase shifter operation ..... 13

**A.D. Kalyonov**

Design method for broadband differential attenuators ..... 26

**Processes and technology**

**V.Yu. Kireev, D.A. Kostyukov, V.V. Odinokov**

Magnetron sputtering processes and equipment in the manufacturing  
technology of integrated circuit metallization systems ..... 32

**A.D. Kalyonov, V.V. Losev, L.V. Nedashkovskiy, Y.A. Chaplygin**

Comparison of high-frequency capabilities of domestic 90 nm and  
180 nm CMOS technologies on the example of design a quadrature  
demodulator mixing block ..... 52; 57

**M.V. Chernyaev, S.A. Gorokhov, S.I. Patyukov, A.A. Rezvanov**

Low-temperature radical ISSG oxidation of silicon ..... 62; 69

**Properties of materials**

**K.B. Tynyshtykbayev**

Energy of porous silicon nanocrystals ..... 76

**Abstracts** ..... 95

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 190-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

В данном номере внимание читателей журнала привлекут тематические материалы, опубликованные под рубриками: «Физические явления», «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Свойства материалов».

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

Номер открывается разделом «Физические явления», в котором решается задача численного моделирования значений компонент тензоров концентрации напряжений и деформаций в мезопористых структурах на основе кремния с адсорбированной водой, замерзшей в условиях пространственного ограничения.

В первой статье раздела «Разработка и конструирование» описана методика измерения полного времени установки фазового состояния при работе дискретного фазовращателя в системах на основе фазированных решеток. Во второй статье представлен метод проектирования и расчета дифференциального аттенюатора с компенсацией паразитного сигнала с результатами проектирования и моделирования аттенюатора с использованием технологии КМОП 180 нм.

В следующем разделе «Процессы и технология» авторами рассмотрен комплекс задач, связанный с формированием систем металлизации интегральных микросхем (ИМС), показана важность систем для обеспечения быстродействия и производительности ИМС при обработке и хранении информации. Во второй статье приведены результаты проектирования смесительного квадратурного ядра демодулятора для КМОП технологий с проектными нормами 90 нм и 180 нм, приведены результаты моделирования АЧХ спроектированного блока,



сформулированы предварительные выводы о целесообразности использования данных технологий для разработки высокочастотных изделий. В заключительной статье этого раздела авторами исследована кинетика радикального окисления кремниевой пластины в системе индивидуальной обработки при проведении процесса низкотемпературного окисления (500–800 °С) с генерацией пара у поверхности пластины (*in situ* steam-generation – ISSG).

В заключительном разделе «Свойства материалов» рассмотрена энергетика 3d-нанокристаллитов пористого кремния применительно к процессам низкотемпературного синтеза пленок графеноподобных нанокompозитов, показано, что энергетика нанокристаллитов обусловлена избыточной поверхностной энергией пористого Si и наноразмерными эффектами, возникающими на локальных участках его атомарно шероховатой поверхности.

Приглашаем всех заинтересованных читателей к сотрудничеству!

С уважением,  
главный редактор журнала,  
академик РАН,

Г.Я. Красников

### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В СТРУКТУРАХ $\text{por-Si} - \text{H}_2\text{O}$ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВОДЫ

Решается задача численного моделирования значений компонент тензоров концентрации напряжений и деформаций в мезопористых структурах на основе кремния с адсорбированной водой, замершей в условиях пространственного ограничения. Построенная модель учитывает наличие на поверхности пор в указанных материалах естественного слоя диоксида кремния, структуру неоднородной среды (отношение толщины оксидного слоя к радиусу нитевидной поры, а также ориентацию пор в пространстве кремниевой мембраны) и объемное содержание компонентов.

**Ключевые слова:** пористый кремний, вода, лед, матричный композит, тензоры концентрации напряжений и деформаций, моделирование.

#### Сведения об авторах:

Бардушкин Владимир Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва), e-mail: bardushkin@mail.ru

Лавров Игорь Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва), e-mail: iglavr@mail.ru

Яковлев Виктор Борисович, профессор РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник и ученый секретарь Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва), e-mail: yakvb@mail.ru

Кочетыгов Андрей Александрович, младший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва), e-mail: aakcht@gmail.com

Бардушкин Андрей Владимирович, младший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва), e-mail: i170k@yandex.ru

### STRESS-STRAIN CONDITION IN $\text{por-Si} - \text{H}_2\text{O}$ STRUCTURES NEAR THE PHASE TRANSITION POINT OF WATER

The problem of numerical simulation of the values of the components of stress and strain concentration tensors in mesoporous structures based on silicon with adsorbed water frozen under conditions of spatial limitation is solved. The constructed model takes into account the presence of a natural layer of silicon dioxide on the surface of pores in specified materials, the structure of an inhomogeneous medium (the ratio of the thickness of the oxide layer to the radius of the filamentous pore, as well as the orientation of the pores in the space of the silicon membrane), and the volume content of the components.

**Keywords:** porous silicon, water, ice, matrix composite, stress and strain concentration tensors, simulation.

#### Data of authors:

Bardushkin Vladimir Valentinovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: bardushkin@mail.ru

Lavrov Igor Viktorovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Nagatinskaya street, house 16a, e-mail: iglavr@mail.ru

Yakovlev Victor Borisovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Science, Chief Scientific Officer of Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Nagatinskaya street, house 16a, e-mail: yakvb@mail.ru

Kochetygov Andrej Aleksandrovich, Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Nagatinskaya street, house 16a, e-mail: aakcht@gmail.com

Bardushkin Andrej Vladimirovich, junior research assistant of Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Nagatinskaya street, house 16a, e-mail: i170k@yandex.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ УСТАНОВКИ ФАЗОВОГО СДВИГА ПРИ РАБОТЕ ДИСКРЕТНОГО СВЧ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ

В работе описана методика измерения полного времени установки фазового состояния при работе дискретного фазовращателя в системах на основе фазированных решеток. Предложенная методика апробируется на основе экспериментального исследования многофункциональной GaAs микросхемы X-диапазона частот с интегрированным блоком фазовращателя, с использованием современных измерительных комплексов на основе квадратурных демодуляторов.

**Ключевые слова:** фазовращатель, IQ демодулятор, фазовый сдвиг, демодуляция.

#### Сведения об авторах:

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

Путря Михаил Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры ИЭМС, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, 1, e-mail: mishapmg@gmail.com

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

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

### PHASE SHIFT SETTING TIME MEASUREMENT RESEARCH DURING A DISCRETE RF PHASE SHIFTER OPERATION

The paper describes a method for measuring the total time of the phase state setting during discrete phase shifter operation in phased array-based systems. The proposed method is tested using an experimental study of a multifunctional GaAs chip in the X-band frequency range with an integrated phase shifter unit in different lab settings with modern measuring complexes based on quadrature demodulators.

**Keywords:** phase shifter, IQ demodulator, phase shift, demodulation.

#### Data of authors:

Kotlyarov Evgeny Yurievich, Stock Company "Molecular Electronics Research Institute", 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

Putrya Mikhail Georgievich, Doctor of Engineering Science, Professor of the department Integrated Electronics and Microsystems, "National research university "Moscow institute of electronic technology", 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 1, e-mail: mishapmg@gmail.com

Mikhailov Victor Yurievich, Stock Company "Molecular Electronics Research Institute", 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: vmikhaylov@niime.ru

Tishin Alexander Sergeevich, PhD in Engineering sciences, Stock Company "Molecular Electronics Research Institute", 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: atishin@niime.ru

### МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ АТТЕНУАТОРОВ

В работе приведено описание метода проектирования и расчета дифференциального аттенуатора с компенсацией паразитного сигнала. Проектирование дифференциальных широкополосных СВЧ аттенуаторов является важной и трудоемкой задачей. В статье представлены результаты проектирования и моделирования дифференциального аттенуатора с использованием технологии КМОП 180 нм.

**Ключевые слова:** аттенуатор, развязка, потери, КМОП, СВЧ.

#### Сведения об авторе:

Калёнов Александр Дмитриевич, 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: kalyonov.alex@yandex.ru

### СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.

#### Часть 1. Эволюция систем металлизации в процессе развития планарной КМОП технологии

Рассмотрен комплекс задач, связанный с формированием систем металлизации интегральных микросхем (ИМС). Показано, что быстроедействие логических ИМС, начиная определяться системой металлизации на основе алюминиевых сплавов с системой изоляции на основе SiO<sub>2</sub> для уровня технологии (УТ) 180 нм, а при использовании системы металлизации на основе меди с системой изоляции на основе диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью, равной 2,0 – для УТ 90 нм. Приведены виды, элементы и параметры многоуровневых систем металлизации на базе алюминиевых сплавов и меди, а также используемых в них материалов и характеристик слоев систем изоляции, по мере уменьшения технологической нормы (минимального размера элементов) ИМС. Перечислены основные характеристики пленок, осаждаемых на плоские и рельефные подложки, и проанализированы проблемы их достоверного определения и практической реализации. Показано, что в настоящее время в системах металлизации процессы магнетронного распыления применяются для осаждения пленок алюминиевых сплавов, пленок адгезионно барьерных структур Ti/TiN и Ta/TaN, а также пленок TiN, используемых в качестве антиотражающих покрытий. Сформулированы требования к процессам осаждения методом магнетронного распыления всех пленок, применяемых в системах металлизации.

**Ключевые слова:** быстроедействие и производительность ИМС; технологическая норма; уровень технологии производства кристаллов ИМС; системы металлизации ИМС на основе алюминиевых сплавов и меди; диэлектрические слои для межуровневой изоляции систем металлизации; характеристики слоев на плоских и рельефных подложках; аспектное отношение; равномерность и конформность слоев и пленок; пленки, осаждаемые в процессах магнетронного распыления и требования к ним.

#### Сведения об авторах:

Киреев Валерий Юрьевич, АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», доктор технических наук, 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: valerikireev@mail.ru

Костюков Денис Андреевич, АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: dkostyukov@niitm.ru

Одинокоев Вадим Васильевич, заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», доктор технических наук, 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: vodinokov@niitm.ru

### DESIGN METHOD FOR BROADBAND DIFFERENTIAL ATTENUATORS

The paper describes a method for designing and calculating a differential attenuator with parasitic signal compensation. Designing differential broadband microwave attenuators is an important and time-consuming task. The article presents the results of designing and modeling a differential attenuator using 180 nm CMOS technology.

**Keywords:** attenuator, loss, CMOS, attenuation, microwave.

#### Data of author:

Kalyonov Alexander Dmitrievich, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: kalyonov.alex@yandex.ru

### MAGNETRON SPUTTERING PROCESSES AND EQUIPMENT IN THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF INTEGRATED CIRCUIT METALLIZATION SYSTEMS

A set of tasks related to the formation of integrated circuit (IC) metallization systems is considered. It is shown that the performance of logical IC begins to be determined by a metallization system based on aluminum alloys with a SiO<sub>2</sub>-based insulation system for a technology level N180 nm, and when using a copper-based metallization system with a dielectric insulation system with a low dielectric constant equal to 2.0 – for N90 nm. The types, elements and parameters of multilevel metallization systems based on aluminum alloys and copper, as well as the materials and the characteristics of the layers of insulation systems used in them, are given as the technological norm (minimum size of elements) of the IC decreases. The main characteristics of films deposited on flat and relief substrates are listed, and the problems of their reliable determination and practical implementation are analyzed. It is shown that magnetron sputtering processes are currently used in metallization systems for the deposition of aluminum alloy films, films of Ti/TiN and Ta/TaN adhesive barrier structures, as well as TiN films used as anti-reflective coatings. The requirements for the deposition processes by magnetron sputtering of all films used in metallization systems are formulated.

**Keywords:** IC speed and performance; technological norm; level of IC crystal production technology; IC metallization systems based on aluminum alloys and copper; dielectric layers for interlevel insulation of metallization systems; characteristics of layers on flat and relief substrates; aspect ratio; uniformity and conformality of layers and films; films deposited in magnetron sputtering processes and requirements for them.

#### Data of authors:

Kireev Valeriy Yuryevich, Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing", doctor of technical sciences, 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, valerikireev@mail.ru

Kostyukov Denis Andreyevich, Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing", 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, dkostyukov@niitm.ru

Odinokov Vadim Vasilyevich, deputy general, Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing", doctor of technical sciences, 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, vodinokov@niitm.ru

### СРАВНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КМОП ТЕХНОЛОГИЙ С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 90 НМ И 180 НМ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СМЕСИТЕЛЬНОГО БЛОКА КВАДРАТУРНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА

В работе приведены результаты проектирования смесительного ядра квадратурного демодулятора для КМОП-технологий с проектными нормами 90 нм и 180 нм. Приведены результаты моделирования АЧХ спроектированного блока. На основе данного примера сформулированы предварительные выводы о целесообразности использования данных технологий для разработки высокочастотных изделий.

**Ключевые слова:** ячейка Гильберта, квадратурный демодулятор, КМОП, аналоговый смеситель.

#### Сведения об авторе:

Калёнов Александр Дмитриевич, 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: kalyonov.alex@yandex.ru

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;

Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, 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: president@miet.ru

### НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ РАДИКАЛЬНОЕ ISSG ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Исследована кинетика радикального окисления кремниевой пластины в системе индивидуальной обработки при проведении процесса низкотемпературного окисления (500...800 °С) с генерацией пара у поверхности пластины (*in situ steam-generation* – ISSG). Для определения констант радикального окисления использовались полученные зависимости толщины оксида от времени при различной температуре и фиксированных остальных параметрах технологического процесса. Показано, что скорость низкотемпературного радикального окисления соответствует экспоненциальному закону роста. Самоограничение толщины оксида, наблюдаемое при температуре ниже 700 °С, имеет большое практическое значение для формирования тонкого диэлектрика толщиной менее 1 нм, так как позволяет подбирать необходимую толщину оксида, изменяя температуру, а не время процесса.

**Ключевые слова:** радикальное окисление, кинетика роста оксида кремния, экспоненциальный закон роста, самоограничение толщины оксида.

#### Сведения об авторах:

Черняев Михаил Владимирович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 123460, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: mchernyaev@niime.ru

Горохов Сергей Александрович, Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 123460, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: sgorohov@niime.ru

Патюков Сергей Иванович, кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 123460, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: spatyukov@niime.ru

Резванов Аскар Анварович, кандидат физико-математических наук, Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 123460, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: arezvanov@niime.ru

### COMPARISON OF HIGH-FREQUENCY CAPABILITIES OF DOMESTIC 90 NM AND 180 NM CMOS TECHNOLOGIES ON THE EXAMPLE OF DESIGN A QUADRATURE DEMODULATOR MIXING BLOCK

The paper presents the results of design the mixing core of a quadrature demodulator for 90 nm and 180 nm CMOS technologies. The results of simulation the frequency response of the designed block are presented. On the basis of this example, preliminary conclusions on the feasibility of using these technologies for the development of high-frequency products are formulated.

**Keywords:** Gilbert cell, quadrature demodulator, CMOS, analog mixer.

#### Data of authors:

Kalyonov Alexander Dmitrievich, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: kalyonov.alex@yandex.ru

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

Chaplygin Yuri Alexandrovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science Engineering, Professor, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: president@miet.ru

### LOW-TEMPERATURE RADICAL ISSG OXIDATION OF SILICON

The kinetics of single wafer radical oxidation of a silicon during a low-temperature (500...800 °C) *in situ* steam-generation (ISSG) oxidation process based on hydrogen combustion is investigated. To determine the constants of radical oxidation, the obtained dependences of the oxide thickness on time at different temperatures and fixed other parameters of the technological process were used. It is shown that the rate of low-temperature radical ISSG oxidation corresponds to the exponential growth law. The self-limitation of the oxide thickness observed at temperatures below 700 °C is of great practical importance for the formation of a thin dielectric with a thickness of less than 1 nm, since it allows to control the process of oxidation by temperature, and not by processing time as with standard thermal oxidation.

**Keywords:** radical oxidation, kinetics of silicon oxide growth, exponential growth law, self-limiting oxide thickness.

#### Data of authors:

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

Gorokhov Sergey Aleksandrovich, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation; 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: sgorohov@niime.ru

Patyukov Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Stock Company "Molecular Electronics Research Institute"; 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: spatyukov@niime.ru

Rezvanov Askar Anvarovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation; 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: arezvanov@niime.ru

**ЭНЕРГЕТИКА НАНОКРИСТАЛЛИТОВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

Рассмотрена энергетика 3d- нанокристаллитов пористого кремния nc-PS применительно к процессам низкотемпературного синтеза пленок графеноподобных нанокмполитов. Показано, что энергетика nc-PS обусловлена избыточной поверхностной энергией нанокристаллитов пористого Si и наноразмерными эффектами, возникающими на локальных участках атомарно шероховатой поверхности nc-PS. Самоорганизация наноразмерных систем пор с образованием периодически упорядоченных структур на реальной поверхности пористого Si определяется квантовыми эффектами, которые обусловлены шероховатостью атомов в виде атомных ступеней, выступов и определяют появление дальнедействующих, капиллярно-упругих сил поверхности. Помимо дальнедействующих поверхностных капиллярно-упругих сил, важную роль играют дефектно-деформационные силы границы интерфейса нанокристалл/матрица монокристаллического кремния, которые являются, по существу, граничными условиями мета-поверхностей двумерного 2DM и квазидвумерного Q2DM материалов, которые резко изменяют физические свойства кристаллических решеток матрицы Si. В статье рассмотрены особенности этих сил и их влияние на энергетiku низкотемпературного синтеза графеноподобных углеродных нанокмполитов на поверхности пористого кремния.

**Ключевые слова:** пористый Si, нанокристаллиты, низкотемпературный синтез, графеновые нанокмполиты.

**Сведения об авторе:**

Тыныштыкбаев Курбангали Байназарович, профессор, доктор технических наук, Физико-технический институт, Сатбаев университет, Алматы, 050032, Казахстан, e-mail: k.tnyshytykbaev@sci.kz

**ENERGY OF POROUS SILICON NANOCRYSTALS**

The energy of porous silicon nanocrystallites nc-PS as applied to the processes of low-temperature synthesis of films of graphene-like nanocomposites is considered. Shown that the energy of nc-PS is due to the excess surface energy of porous Si nanocrystallites and nanoscale effects arising in local areas of the atomically rough surface of nc-PS. Self-organization of nanoscale pore systems with the formation of periodically ordered structures on the real surface of porous Si is determined by quantum effects, which are due to the roughness of atoms in the form of atomic steps, protrusions and determine the appearance of long-range, capillary-elastic surface forces. In addition to long-range surface capillary-elastic forces, an important role is played by the defect-deformation forces of the nanocrystal/single-crystal silicon interface boundary, which drastically change the physical properties of the boundary crystal lattices of the Si- matrix. The article considers the features of these forces and their influence on the energy of low-temperature synthesis of graphene-like carbon nanocomposites on the surface of porous silicon.

**Keywords:** porous Si, nanocrystallites, low-temperature synthesis, graphene nanocomposites.

**Data of author:**

Tynyshytykbaev Kurbangali Baynazarovich, professor, Doctor of Technics Science, Satbayev University, Physics and Technology Institute, Almaty 050032, Kazakhstan, e-mail: k.tnyshytykbaev@sci.kz