

**"ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.  
Серия 3.  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"**

**Редакционный совет**  
**Главный редактор**  
**Красников Г. Я.**, д. т. н.,  
академик РАН

**Члены редакционного совета**

**Аристов В. В.**,  
член-корреспондент РАН  
**Асеев А. Л.**, д. ф.-м. н.,  
академик РАН  
**Бетелин В. Б.**, д. ф.-м. н.,  
академик РАН  
**Бокарев В. П.**, к. х. н.,  
ответственный секретарь  
**Бугаев А. С.**, д. ф.-м. н.,  
академик РАН  
**Быков В. А.**, д. т. н.  
**Галиев Г. Б.**, д. ф.-м. н.  
**Горбачевич А. А.** д. ф.-м. н.,  
член-корреспондент РАН  
**Горнев Е. С.**, д. т. н.,  
зам. главного редактора  
**Грибов Б. Г.**, д. х. н.,  
член-корреспондент РАН  
**Зайцев Н. А.**, д. т. н.  
**Ким А. К.**, к. т. н.  
**Критенко М. И.**, к. т. н.  
**Немудров В. Г.**, д. т. н.  
**Петричкович Я. Я.**, д. т. н.  
**Сигов А. С.**, д. ф.-м. н.,  
академик РАН  
**Степковский А. Л.**, д. т. н.,  
академик РАН  
**Чаплыгин Ю. А.**, д. т. н.,  
академик РАН  
**Шелепин Н. А.**, д. т. н.,  
зам. главного редактора  
**Эннс В. И.**, к. т. н.

**Адрес редакции**

📍 124460 г. Москва, Зеленоград,  
1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1  
☎ +7 495 229-70-43  
✉ journal\_EEM-3@mikron.ru  
🌐 www.niime.ru/  
zhurnal-mikroelektronika  
Журнал издается с 1965 года

**Учредитель**

АО "Научно-исследовательский  
институт молекулярной  
электроники"

**Слово редактора** ..... 4

**Разработка и конструирование**

**М. А. Королев, Ю. А. Чаплыгин, А. С. Ключников, Д. И. Ефимова**  
Планарный КНИ беспереходной МОП-транзистор ..... 5–14

**Д. В. Тельпухов, А. И. Деменева, Т. Д. Жукова, Н. С. Хрущев**  
Исследование и разработка систем автоматизированного  
проектирования схем функционального контроля  
комбинационных логических устройств ..... 15–22

**Г. Н. Панин**  
Мемристивные двумерные электронные системы – новый тип  
логических переключателей и памяти ..... 23–41

**Процессы и технология**

**Г. Я. Красников, О. П. Гущин, М. В. Литаврин, Е. С. Горнев**  
Некоторые аспекты самосовмещенного мультипаттернирования  
в иммерсионной литографии ..... 42–53

**Р. К. Яфаров, В. Я. Шаныгин**  
Влияние микроволновой плазмохимической обработки на  
морфологию и автоэмиссионные свойства кристаллов кремния ..... 54–58

**Математическое моделирование**

**Г. Я. Красников, В. В. Бардушкин, Д. А. Карташов,  
А. А. Кочетыгов, Ю. И. Шиляева, В. Б. Яковлев**  
Эффективные упругие характеристики анодного оксида  
алюминия с нитевидными порами, заполненными  
поливинилиденфторидом ..... 59–63

**В. И. Анисимкин, Э. Верона, Н. В. Воронова**  
Расчет температурных профилей испарения микрокапель  
жидкости с поверхности твердотельных стержней ..... 64–67

**Надежность**

**Г. Я. Красников, А. С. Лушников, В. Д. Мещанов, Е. С. Рыбалко,  
Н. Н. Фомичева, Н. А. Шелепин**  
Исследование сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления  
одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ ..... 68–76

Журнал включен Всероссийской аттестационной комиссией (ВАК)  
в число изданий, рекомендованных для публикации статей соискателей  
ученых степеней кандидата и доктора наук №1969

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

**Editorial Council**

**Chief Editor**

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

**The Members of Editorial Council**

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

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

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

**Bokarev V.P.**, Ph.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.,  
Corresponding Member of the RAS

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

**Nemudrov V.G.**, 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 Y.A.**, Sc. D.,  
Full Member of the RAS

**Shelepin N.A.**, Sc. D.,  
Deputy Chief Editor

**Enns V.V.**, Ph.D.

**Editorial Staff Address**

📍 1-st Zapadnyy pr-d 12, str. 1.  
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**

**M. A. Korolev, Y. A. Chaplygin, A. S. Klyuchnikov, D. I. Efimova**  
Planar SOI junctionless MOSFET ..... 5–14

**D. V. Telpukhov, A. I. Demeneva, T. D. Zhukova, N. S. Khrushchev**  
The research and development of automation systems for the  
concurrent error detection combinational circuits ..... 15–22

**G. N. Panin**  
Memristive electronic systems – a new type of electronic logic  
switches and memory ..... 23–41

**Processes and Technology**

**G. Ya. Krasnikov, O. P. Gushchin, M. V. Litavrin, E. S. Gornev**  
Some aspects of self-aligned multipatterning in immersion  
lithography ..... 42–53

**R. K. Yafarov, V. Ya. Shanygin**  
Influence of microwave plasma-chemical processing on morphology  
and field emission properties of crystals of silicon ..... 54–58

**Mathematical simulation**

**G. Ya. Krasnikov, V. V. Bardushkin, D. A. Kartashov,  
A. A. Kochetygov, Yu. I. Shilyaeva, V. B. Yakovlev**  
Effective elastic characteristics of the anodic alumina having  
threadlike pores filled with polyvinylidene fluoride ..... 59–63

**V. I. Anisimkin, E. Verona, N. V. Voronova**  
The temperature profile calculation for micro-droplet evaporation  
from solid rod ..... 64–67

**Reliability**

**G. Ya. Krasnikov, A. S. Lushnikov, V. D. Meschanov, E. S. Rybalko,  
N. N. Fomicheva, N. A. Shelepin**  
Study of the fault tolerance of SRAM with the function of correcting  
single event upsets caused by heavy ions ..... 68–76

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 (HAC)

**ПЛАНАРНЫЙ КНИ БЕСПЕРЕХОДНОЙ МОП-ТРАНЗИСТОР**

Беспереходные МОП-транзисторы (МОП БПТ) обладают рядом преимуществ перед традиционными с точки зрения простоты конструкции, технологии изготовления и снижения влияния короткоканальных эффектов на характеристики прибора. Однако известные экспериментальные нанопроволочные МОП БПТ, из-за возникновения паразитного биполярного транзистора в закрытом состоянии, имеют высокие подпороговые токи. С целью решения этой проблемы в данной работе представлены структурная модель планарного КНИ МОП БПТ по нормам технологии 90 нм, маршрут математического моделирования и с использованием приборно-технологического моделирования в среде TCAD исследовано влияние расположения контактов сток / истоковых областей и концентрации примеси в пленке кремния КНИ МОП БПТ на пороговое напряжение, токи насыщения и подпороговые токи. В результате исследования обнаружен и объяснен новый короткоканальный эффект. Он проявляется под влиянием ОПЗ n-n-перехода между контактом и стоком на зарядовое состояние области канала, когда расстояние между электродом затвора и контактом становится меньше 100 нм. Показано, что при формировании планарных беспереходных КНИ МОП-транзисторов по технологии 90 нм необходимо создавать сток-истоковые области размером 250 нм и задавать концентрацию в пленке в n-канальном транзисторе –  $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и в p-канальном –  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что позволяет снизить подпороговые токи прибора до величины 10–13 А / мкм и иметь соотношение токов в открытом и закрытом состоянии  $10^8$ . Разработан маршрут изготовления КНИ КМОП-структуры на основе БПТ, который соответствует стандартному маршруту изготовления КНИ КМОП ИС с технологической нормой 90 нм, за исключением таких операций, как формирование первого слейсера (осаждение ТЭОС и нитрида кремния) и создания областей LDD, Halo и Pocket (три ионные имплантации, одна из них под углом).

**Ключевые слова:** беспереходный транзистор, пороговое напряжение, подпороговый ток, ток насыщения, сток-истоковые контакты, межзонное туннелирование

**Сведения об авторах:**

Королев Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: mikor33@icloud.com;

Чаплыгин Юрий Александрович, доктор технических наук, академик Российской академии наук, президент Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: president@miet.ru;

Ключников Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12, строение 1, e-mail: aklyuchnikov@mikron.ru;

Ефимова Дарья Игоревна, магистр, стажер-исследователь кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: ef\_dasha@mail.ru.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

В настоящее время актуальность исследований в области повышения надежности функционирования микросистемных систем неуклонно возрастает. Во многом это связано с непрекращающейся миниатюризацией, приводящей к снижению порога воздействия, достаточного для возникновения сбоев и отказов. Статья посвящена актуальной проблеме построения схем функционального контроля, обнаруживающих ошибки. Исследуются различные помехоустойчивые коды (код повторения, Бергера, Хемминга и Голая) с точки зрения применимости их к задаче построения контролепригодных логических устройств. В статье рассматриваются различные аспекты аппаратной реализации схем функционального контроля, а также вопросы разработки средств автоматизации проектирования. На большом наборе контрольных комбинационных схем исследована эффективность помехоустойчивых кодов с точки зрения структурных затрат и обнаруживающей способности.

**Ключевые слова:** сбоеустойчивость, функциональный контроль, комбинационные схемы, логическое маскирование, разделимые коды, схема дублирования, код Бергера, код Хемминга, код Голая, обнаруживающая способность, структурная избыточность, инжектирование ошибок

**Сведения об авторах:**

Дмитрий Владимирович Тельпухов, кандидат технических наук, руководитель отдела методологии проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: nofrost@inbox.ru

Деменева Алена Игоревна, инженер-исследователь отдела методологии проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: alena\_demeneva@bk.ru

Жукова Татьяна Дмитриевна, инженер-исследователь отдела систем автоматизированного проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: zhukova\_t@ippm.ru

Хрущев Никита Сергеевич, стажер-исследователь отдела методологии проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: nilk68@ya.ru

**PLANAR SOI JUNCTIONLESS MOSFET**

Junctionless MOSFETs have a number of advantages over traditional ones in terms of simplicity of design, manufacturing technology and reducing the impact of short-channel effects on the device characteristics. However, the known experimental nanowire MOSFETs have high subthreshold currents due to the parasitic bipolar transistor appearance in the closed state. In order to solve this problem, a structural model of a planar SOI in accordance with the technology standards of 90 nm, the route of mathematical modeling have been developed. Also with the use of the TCAD environment the influence of the impurity concentration in the SOI MOSFET silicon film on the threshold voltage, saturation currents and subthreshold currents have been analyzed. As a result of the research a new short-drain effect was discovered and explained. It manifests itself under the influence of the SCR of the n-n transition between the contact and the drain on the channel region charge state as the distance between the gate electrode and the contact becomes less than 100 nm. It is shown that in the formation of planar junctionless MOSFETs with 90 nm technology, it is necessary to create drain-source regions with a size of 250 nm and to specify the concentration in the film in an n-channel transistor –  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and in a p-channel transistor –  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , which allows reducing subthreshold currents of the device up to 10–13 A /  $\mu\text{m}$  and have a current ratio in the open and closed state  $10^8$ . A route for manufacturing a SOI CMOS structure based on the JLT has been developed. It corresponds to the standard route for the SOI CMOS IC production with a 90 nm technological norm, except such operations as the formation of the first spacer (precipitation of TEOS and silicon nitride) and creation of LDD, Halo and Pocket regions (three ion implantations, one of them at an angle).

**Keywords:** junctionless transistor, threshold voltage, subthreshold current, saturation current, drain-source contacts, interband tunneling

**Data of authors:**

Korolev Mikhail Aleksandrovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems of the National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: mikor33@icloud.com;

Chaplygin Yury Aleksandrovich, Doctor of Engineering Sciences, a full member of the Russian Academy of Sciences, the President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: president@miet.ru;

Klyuchnikov Alexey Sergeevich, candidate of Engineering Sciences, head of laboratory, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, d.12 / 1, 1-st Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: aklyuchnikov@mikron.ru;

Efimova Darya Igorevna, master, trainee-researcher of the Department of Integral Electronics and Microsystems of the National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: ef\_dasha@mail.ru.

**THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATION SYSTEMS FOR THE CONCURRENT ERROR DETECTION COMBINATIONAL CIRCUITS**

Today, the urgent task is to increase the reliability of microelectronic systems. In many ways it is connected with permanent miniaturization that leads to decreasing of a threshold of impact which is sufficient for the occurrence of failures. The article is devoted to the actual problem of constructing concurrent error detection schemes. Different error detection codes are investigated (repetition code, Berger, Hamming and Golay) from the point of view of their applicability to the problem of creating CED schemes. Various aspects of a hardware implementation of CED schemes and development of design automation tools are considered in the article. The effectiveness of error detection codes has been investigated on a large set of benchmark schemes in terms of structural costs and vulnerability.

**Keywords:** concurrent error detection (CED), fault tolerance, reliability, combinational circuits, logic masking, duplication, Berger code, Hamming code, Goley code, hardware redundancy, vulnerability

**Data of authors:**

Telpukhov Dmitriy Vladimirovich, candidate of Technical Science, Head of the department of integrated circuits design methodology, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: nofrost@inbox.ru

Demeneva Alena Igorevna, Research engineer, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: alena\_demeneva@bk.ru

Zhukova Tatyana Dmitrievna, Research engineer, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: zhukova\_t@ippm.ru

Khrushchev Nikita Sergeevich, Trainee, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: nilk68@ya.ru

### МЕМРИСТИВНЫЕ ДВУМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ – НОВЫЙ ТИП ЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ПАМЯТИ

Представлен обзор новых резистивных переключателей и памяти на основе атомарных двумерных кристаллов. Особое внимание уделено концепции самоорганизованных синапсодобных мемристивных систем для информационных устройств и нейроморфных вычислений. Рассмотрен новый тип мемристора с фотозатвором, управляемый электрически и оптически в широком диапазоне длин волн, который может быть использован для решения большого круга задач, связанных с обработкой изображений, распознаванием образов, звуков, движений, речи, необходимых для создания искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** мемристор, резистивная память, графен, двумерные кристаллы, фоторезистивное переключение

#### Сведения об авторах:

Панин Геннадий Николаевич; кандидат физико-математических наук, профессор; Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук, 142432, Московская обл., Ногинский р-н, Чернозоловка, Институтская ул., д. 6; Исследовательский Центр квантово-функциональных полупроводников, Академия нанотехнологий, Университет Донггук, 100-715, Сеул, Южная Корея

### НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ САМОСОВМЕЩЕННОГО ПАТТЕРНИРОВАНИЯ В ИММЕРСИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

Мультипаттернирование позволило продолжить масштабирование технологии чипов до нормы 28 нм и далее. Самосовмещенное двойное паттернирование (SADP) и самосовмещенное четырехкратное паттернирование (SAQP), а также итерации Litho-Etch / Litho-Etch (LELE) широко используются в полупроводниковой индустрии, так как это позволяет формировать структуры с суб-193нм-литографическими размерами для таких слоев, как FIN, затворы и критические слои металлизации [1]. Однако при мультипаттернировании увеличивается сложность маршрута, а также возрастают случайные ошибки положения края, зависящие в том числе от точности совмещения.

В статье рассматриваются методы мультипаттернирования для формирования линий и контактных окон, их преимущества и недостатки, а также способы уменьшения ошибок положения края, в том числе за счет применения самосовмещенных методов.

**Ключевые слова:** мультипаттернирование, ошибка положения края, самосовмещенные методы, подрезание, блокирование

#### Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, академик Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

Гущин Олег Павлович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: ogushin@niime.ru;

Литаврин Михаил Владимирович, Московский физико-технический институт (Государственный университет), 141701 Россия, г. Долгопрудный, Институтский переулок д. 9; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: mlitavrin@niime.ru;

Горнев Евгений Сергеевич, доктор технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: egornev@niime.ru

### ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МОРФОЛОГИЮ И АВТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Исследовано влияние плазмохимической модификации поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния. Показано, что травление пластин кремния в высокоионизированной микроволновой плазме с использованием хладона-14 позволяет управлять в широких пределах порогом напряженности электрического поля и максимальными плотностями автоэмиссионных токов. Рассмотрены физико-химические механизмы, ответственные за модификацию поверхности и автоэмиссионные характеристики кристаллов кремния.

**Ключевые слова:** полевая эмиссия электронов, морфология, кремний, модификация поверхности

#### Сведения об авторах:

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, профессор, заведующей лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 410019, Россия, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, e-mail: rirpc@yandex.ru;

Шаныгин Виталий Яковлевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 410019, Россия, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, e-mail: vitairerun@mail.ru.

### MEMRISTIVE ELECTRONIC SYSTEMS – A NEW TYPE OF ELECTRONIC LOGIC SWITCHES AND MEMORY

An overview of new resistive switches and memory based on atomic two-dimensional crystals is presented. Particular attention is paid to the concept of self-organized synapse-like memristive systems for information devices and neuromorphic computations. A new type of memristor with a photogate, controlled electrically and optically over a wide range of wavelengths, can be used to solve a wide range of tasks related to image processing, image recognition, sounds, movements and speech recognition needed to create artificial intelligence.

**Keywords:** memristor, resistive memory, graphene, two-dimensional crystals, photoresistive switching

#### Data of authors:

Panin Gennady Nikolaevich; candidate of physical and mathematical Sciences, Professor; Institute of Microelectronics Technology, the Russian Academy of Sciences, Russia, 6, Institutskaya st., Chernogolovka, Noginsk Distr., Moscow Region, 142432, Quantum-Functional Semiconductors Research Center, Academy of Nano-Information Technologies, Dongguk University, 100-715, Seoul, South Korea

### SOME ASPECTS OF SELF-ALIGNED MULTIPATTERNING IN IMMERSION LITHOGRAPHY

Multipatterning has enabled continued scaling of chip technology at the 28 nm node and beyond. Self-aligned double patterning (SADP) and self-aligned quadruple patterning (SAQP) as well as LithoEtch / Litho-Etch (LELE) iterations are widely used in the semiconductor industry to enable patterning at sub 193 immersion lithography resolutions for layers such as FIN, Gate and critical Metal lines [1]. However, multipatterning increases process complexity as well as EPE variations, which depend on overlay including.

In this paper we review multipatterning methods for line / space and contact holes formation, their advantages and disadvantages and also ways to decrease EPE variation, self-aligned techniques including.

**Keywords:** multipatterning, EPE, self-alignment, cutting, blocking

#### Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, doctor of Engineering Sciences, academician of Russian Academy of Sciences, Full Professor, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru; Gushchin Oleg Pavlovich, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: ogushin@niime.ru.

Litavrin Michail Vladimirovich, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 141701, Russia, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: mlitavrin@niime.ru;

Gornev Evgeny Sergeevich, doctor of Engineering Sciences, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: egornev@niime.ru

### INFLUENCE OF MICROWAVE PLASMA-CHEMICAL PROCESSING ON MORPHOLOGY AND FIELD EMISSION PROPERTIES OF CRYSTALS OF SILICON

Influence of plasma-chemical modification of a surface on field emission properties of crystals of silicon is investigated. It is shown, that etching of plates of silicon in high-ionized microwave plasma with use of freon-14 allows operating over a wide range a threshold of electric field strength and the maximum density of field emission currents. Are considered physics – chemical mechanisms responsible for modification of a surface and field emission characteristics of crystals of silicon.

**Keywords:** field emission of electrons, morphology, silicon, modification of a surface

#### Data of authors:

Yafarov Ravil Kyashshafovich, Doctor of Engineering Sciences, Head of laboratory of Submicron electron ion technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Zelenaya St., 38, Saratov, Russia, 410019, e-mail: rirpc@yandex.ru;

Shanygin Vitaliy Yakovlevich: Candidate of Engineering Sciences, research associate of laboratory of Submicron electron ion technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Zelenaya St., 38, Saratov, Russia, 410019, e-mail: vitairerun@mail.ru



### ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С НИТЕВИДНЫМИ ПОРАМИ, ЗАПОЛНЕННЫМИ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДОМ

Решается задача численного моделирования эффективных упругих характеристик композитов типа нановолокна поливинилиденфторида в матрице анодного оксида алюминия. Исследованы зависимости компонент тензора эффективных модулей упругости и коэффициентов упругой анизотропии от параметра структуры композитов, связанного с концентрацией волокон.

**Ключевые слова:** анодный оксид алюминия, поливинилиденфторид, матричный композит, эффективные модули упругости, анизотропия, моделирование

#### Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, академик Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

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», 124460, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: bardushkin@mail.ru;

Карташов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, e-mail: dmitry.kartashov@mail.ru;

Кочетыгов Андрей Александрович, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ, e-mail: aakcht@gmail.com;

Шилиева Юлия Игоревна, кандидат химических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: shilyaeva@gmail.com;

Яковлев Виктор Борисович, профессор Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Высшая математика № 2» МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: yakovlev@miee.ru

### РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИСПАРЕНИЯ МИКРОКАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Решена стандартная задача теплопроводности применительно к испарению капель летучих соединений с поверхности однородного изотропного стержня с теплоизолированными боковыми стенками. Получено выражение для профиля охлаждения стержня по глубине, отражающее его зависимость от времени с начала испарения и до его окончания. Выражение применено к испарению микрокапли этилового спирта с поверхности плавленого кварца. Результаты работы являются основой для разработки нового экспериментального метода исследования жидкостей.

**Ключевые слова:** микрокапля, испарение, твердотельный стержень, акустическая волна, теплопроводность

#### Сведения об авторах:

Анисимкин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, e-mail: anis@cplire.ru;

Верона Энрико, доктор физико-математических наук, Институт фотоники и нанотехнологий Национального Совета Научных Исследований Италии, ViaCineto, 42-1-00156, Roma, Italy; e-mail: veronaenrico@gmail.com;

Воронова Наталья Владимировна, аспирант института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Элап», 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., 10, e-mail: vonavl@mail.ru.

### EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF THE ANODIC ALUMINA HAVING THREADLIKE PORES FILLED WITH POLYVINYLIDENE FLUORIDE

Numerical modeling of the effective elastic characteristics in the polyvinylidene fluoride-filled anodic alumina is carried out. Dependencies of tensor components of effective elastic modules and coefficients of elastic anisotropy on the parameter of composites structure, connected with concentration of polyvinylidene fluoride nanowires, are investigated.

**Keywords:** anodic alumina, polyvinylidene fluoride, matrix composite, effective elastic modules, anisotropy, modeling. Keywords: anodic aluminum oxide, polyvinylidene fluoride, matrix composite, thermoelastic properties, average stress, modelling

#### Data of authors:

Gennady Yakovlevich Krasnikov, academician of Russian Academy of Sciences, doctor of Engineering Sciences, Professor, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, d. 12 / 1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru;

Vladimir Valentinovich Bardushkin, Doctor of Physico-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;

Dmitrii Aleksandrovich Kartashov, Candidate of Engineering Sciences, docent, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, National Research University of Electronic Technology, d. 12 / 1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: dmitry.kartashov@mail.ru;

Andrey Aleksandrovich Kochetygov, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: aakcht@gmail.com;

Yuliya Igorevna Shilyaeva, Candidate of Chemical Sciences, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: shilyaeva@gmail.com;

Viktor Borisovich Yakovlev, Professor of Russian Academy of Sciences, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor of "Higher mathematics No. 2" MIET, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: yakovlev@miee.ru

### THE TEMPERATURE PRO-FILE CALCULATION FOR MICRODROPLET EVAPORATION FROM SOLID ROD

The standard thermal-balance approach is used to study the process of microdroplet evaporation from the surface of thermally isolated solid rod. Expression for the rood cooling profile is derived as a function of time starting from the beginning to the end of the process. The expression is applied for ethyl alcohol microdroplet on fused quartz as an example. Results of the paper are considered as the background for developing new experimental method for liquid analysis.

**Keywords:** microdroplet, evaporation, solid rod, acoustic wave, thermal conductivity

#### Data of authors:

Anisimkin Vladimir Ivanovich, doctor of physical and mathematical Sciences, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy Of Sciences, Mokhovaya 11-7, Moscow, 125009, Russia, e-mail: anis@cplire.ru;

Verona Enrico, Institute for Photonics and Nanotechnologies, Italian Research Council IFN-CNR, Via Cineto, 42-1-00156, Roma, Italy; e-mail: veronaenrico@gmail.com;

Voronova Natalia Vladimirovna, graduate student of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy Of Sciences, "Scientific research Institute "ELPA", Stock Company, 10, 8с5, Panfilovskiyprospekt, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: vonavl@mail.ru.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СБЕОУСТОЙЧИВОСТИ СОЗУ С ФУНКЦИЕЙ ИСПРАВЛЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЗЧ**

Представлены результаты исследования сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ. Приведены модельные и экспериментальные зависимости сбоеустойчивости пилотных образцов СОЗУ емкостью 4 Мбит при воздействии ТЗЧ от частоты исправления информации. Показано соответствие модели и эксперимента.

**Ключевые слова:** СОЗУ, тяжелая заряженная частица, однократный сбой, многократный сбой, обнаружение и коррекция ошибок в СОЗУ

**Сведения об авторах:**

Красников Геннадий Яковлевич, академик Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

Лушников Александр Сергеевич, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: sitmd88@smd-001.ru;

Мещанов Владимир Дмитриевич, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: sitmd11@smd-001.ru;

Рыбалко Егор Сергеевич, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: rybalko@smd-001.ru;

Фомичева Надежда Николаевна, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: fomicheva@smd-001.ru;

Шелепин Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: nchelepin@niime.ru.

**STUDY OF THE FAULT TOLERANCE OF SRAM WITH THE FUNCTION OF CORRECTING SINGLE EVENT UPSETS CAUSED BY HEAVY IONS**

The results of a study of the fault tolerance of SRAM with the function of correcting single event upsets caused by heavy ions are presented. The model and experimental dependencies of the fault tolerance of SRAM samples on the information correction frequency are shown. The correspondence between the model and the experiment is demonstrated.

**Keywords:** SRAM, heavy ion, single event upset (SEU), multiple bit upset (MBU), error detection and correction (EDAC) in SRAM

**Data of authors:**

Krasnikov Gennady Yakovlevich, academician of Russian Academy of Sciences, doctor of Engineering Sciences, Full Professor, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12/1, 1-y Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

Lushnikov Aleksandr Sergeevich, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: sitmd88@smd-001.ru; Meschanov Vladimir Dmitrievich, candidate of Engineering Sciences, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: sitmd11@smd-001.ru;

Rybalko Egor Sergeevich, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: rybalko@smd-001.ru;

Fomicheva Nadezhda Nikolaevna, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: fomicheva@smd-001.ru;

Shelepin Nikolay Alekseevich, doctor of Engineering Sciences, Full Professor, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12/1, 1-y Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: nchelepin@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 30.03.2018.

Отпечатано в типографии ООО «Красногорский полиграфический комбинат».

Номер заказа Е-1314.

✉ 107140, г. Москва, 1-й Красносельский пер., д. 3, оф. 17.

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**

АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»

☎ +7 495 234-01-10 📠 +7 495 956-33-46

✉ journal@electronics.ru

Подготовлено АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»

**КОРРЕКТОР:** А. Лужкова

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА:** А. Небольсин