

# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

## **СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 1(181) 2021

---

# **ELECTRONIC ENGINEERING**

## **SERIES 3 MICROELECTRONICS**

Scientific & Technical Journal

Выпуск 1(181) 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.**Маев 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**Физические явления****Д.В. Рощупкин**Исследование работы акустоэлектронных устройств  
на поверхностных акустических волнах ..... 5**Разработка и конструирование****Г.Я. Красников, В.И. Эннс**Экспертиза применения электронной компонентной базы  
при создании аппаратуры космического и специального  
назначения – важный шаг в решении задачи импортозамещения .... 12**Процессы и технология****В.Ю. Васильев**Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида кремния  
для микро- и нанoeлектроники  
Часть 4. Температурные зависимости скоростей осаждения  
и плотности пленок ..... 18**С.П. Скорняков**Исследование диффузионных профилей распределения  
мышьяка и фосфора в сильнолегированном кремнии ..... 27**А.Н. Королева**Информационно-аналитическое обеспечение процессов  
проектирования и производства СБИС с использованием базовых  
технологий ..... 31**С.П. Скорняков**Влияние низкотемпературных отжигов на параметры  
низковольтных диффузионных *p-n*-переходов ..... 37**Свойства материалов****С.П. Скорняков**Барьерные свойства остаточного оксида кремния при  
формировании низковольтных *p-n*-переходов диффузией  
мышьяка в сильнолегированный кремний ..... 41**Экономика и организация производства****И.В. Кирюшина, Л.В. Поликарпова, Н.Н. Забодаева,****А.В. Нуйкин**Предпосылки разработки профессионального стандарта  
«Специалист по технологии производства наноразмерных  
полупроводниковых приборов и интегральных схем» ..... 44**Аннотации** ..... 55Журнал 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**

**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.**, Dr. Sc.

**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

**Physical Phenomena**

**D.V. Roshchupkin**

Study of acoustoelectronic devices on the surface acoustic waves ..... 5

**Development and Designing**

**G.Ya. Krasnikov, V.I. Enns**

Examination of the use of electronic components in the creation  
of space and special-purpose equipment is an important step in solving  
the problem of import substitution ..... 12

**Processes and Technology**

**V.Yu. Vasilyev**

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

Part 4. Temperature dependencies of deposition rates

and films densities ..... 18

**S.P. Skornyakov**

Investigation of the diffusion profiles of the distribution of arsenic  
and phosphorus in highly doped silicon ..... 27

**A.N. Koroleva**

Information and analytical support of VLSI design and production  
processes using basic technologies ..... 31

**S.P. Skornyakov**

Effect of low-temperature annealing on the parameters of low-voltage  
diffusion *p-n*-transitions ..... 37

**Properties of Materials**

**S.P. Skornyakov**

Barrier properties of residual silicon oxide in the formation  
of low-voltage *p-n*-junctions by the diffusion of arsenic into highly  
alloyed silicon ..... 41

**Economy and Organization of Production**

**I.V. Kiryushina, L.V. Polikarpova, N.N. Zabodaeva,  
A.V. Nuykin**

«Nanoscale semiconductor devices and integrated circuits technology  
specialist» professional standard development suppositions ..... 44

**Abstracts** ..... 55

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

Редколлегия журнала ставит перед собой задачу – сделать журнал узнаваемым среди изданий и известным научно-техническому сообществу, отражающим новейшие достижения микроэлектроники.

В очередном номере журнала вниманию читателей представлено семь оригинальных статей, опубликованных в рубриках: «Физические явления», «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Свойства материалов» и «Экономика и организация производства».

Номер открывается разделом «Физические явления», в котором рассмотрены современные электронно-микроскопические и рентгеновские методы визуализации процесса распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в твердых телах.

В следующем разделе «Разработка и конструирование» авторами обсуждается применение отечественной электронной компонентной базы при создании аппаратуры космического и специального назначения.

Раздел «Процессы и технология» открывается статьей, продолжающей рассмотрение процесса атомно-слоевого осаждения тонких пленок диоксида кремния. В данной работе автором проанализированы данные по температурным зависимостям скоростей роста пленок  $\text{SiO}_2$  при атомно-слоевом осаждении с термической и плазменной активацией при использовании различных реагентов-предшественников. Автором следующей работы исследованы распределения As в  $p$ - $n$ -структурах, формируемых в сильно легированном кремнии КДБ 0,001 (концентрация  $1,3 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$ ) диффузией As в эвакуированной ампуле. В следующей работе рассмотрены особенности формирования



модели для информационно-аналитического обеспечения процессов проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий. В последней работе раздела рассмотрено влияние низкотемпературных отжигов в диапазоне температур 400–950 °С на электрические параметры низковольтных  $p$ - $n$ -структур, формируемых высококонцентрационной диффузией мышьяка.

В следующем блоке «Свойства материалов» исследовано влияние толщины остаточного/естественного оксида кремния ( $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ ) в «окнах» защитного оксида кремния на результаты формирования низковольтных планарных  $p$ - $n$ -структур высококонцентрационной диффузией As в в сильнолегированный кремний в условиях эвакуированной кварцевой ампулы: величину и воспроизводимость величины напряжения пробоя ( $U_{\text{проб}}$ )  $n$ - $p$ -переходов от процесса к процессу.

В заключительном разделе «Экономика и организация производства» рассматриваются уровни квалификации персонала, соответствующие по своим характеристикам специалисту по технологии производства наноразмерных полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Приглашаем к сотрудничеству всех заинтересованных лиц.

С уважением,  
главный редактор журнала,  
академик РАН,

Г.Я. Красников

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

В работе рассмотрены современные электронно-микроскопические и рентгеновские методы визуализации процесса распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в твердых телах. Применение данных методов позволяет визуализировать акустические волновые поля в режиме реального времени, исследовать взаимодействие ПАВ с дефектами кристаллической структуры, исследовать дифракционные явления в акустических пучках, определять скорости ПАВ и углы сноса потока акустической энергии.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, поверхностные акустические волны, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская топография, синхротронное излучение.

#### Сведения об авторе:

Рощупкин Дмитрий Валентинович, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук; 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 6, e-mail: rochtch@iptm.ru

#### ЭКСПЕРТИЗА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПРИ СОЗДАНИИ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ – ВАЖНЫЙ ШАГ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Электронная компонентная база (ЭКБ) – ключевая составляющая радиоэлектронной аппаратуры космического и специального назначения, к техническим и массогабаритным характеристикам которой предъявляются высокие требования. В такой аппаратуре используется большая номенклатура ЭКБ, требуются малые партии изделий. В свою очередь, ЭКБ должна обладать высокой надежностью и отказоустойчивостью, обеспечивать длительную работу в экстремальных внешних условиях, включая расширенный температурный диапазон, разнообразные радиационные воздействия. Дополнительно необходима длительная поддержка производства ЭКБ и гарантированное отсутствие «закладок», т.е. недокументированных аппаратных или программных инструкций, способных приводить к отказу, невыполнению команд или несанкционированной передаче данных.

Стабильное выполнение всех вышеперечисленных требований можно обеспечить, используя в аппаратуре отечественные комплектующие.

**Ключевые слова:** электронная компонентная база, радиоэлектронная аппаратура, импортозамещение.

#### Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, член Президиума Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 12, строение 1, e-mail: gkrasnikov@niime.ru

Эннс Виктор Иванович, кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 12, строение 1, e-mail: venns@niime.ru

#### STUDY OF ACOUSTOELECTRONIC DEVICES ON THE SURFACE ACOUSTIC WAVES

This paper presents the modern electron-microscopic and X-ray diffraction methods for visualization of the surface acoustic wave (SAW) propagation in solids. These methods allow visualizing the acoustic wave fields in the real time mode on the crystal surface, to study the interaction of SAW with the crystal structure defects, to investigate the diffraction phenomena in acoustic beams, to determine the SAW velocities and power flow angles.

**Keywords:** piezoelectrics, ferroelectrics, surface acoustic waves, scanning electron microscopy, X-ray topography, synchrotron radiation.

#### Data of author:

Roshchupkin Dmitry Valentinovich, doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Microelectronics Technology, Russian Academy of Sciences, 6, Academician Ossipyan str., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, e-mail: rochtch@iptm.ru

#### EXAMINATION OF THE USE OF ELECTRONIC COMPONENT IN THE CREATION OF SPACE AND SPECIAL-PURPOSE EQUIPMENT IS AN IMPORTANT STEP IN SOLVING THE PROBLEM OF IMPORT SUBSTITUTION

Electronic component base (ECB) is a key component of radio-electronic equipment for space and special purposes, to the technical and mass-dimensional characteristics of which high requirements are imposed. In such equipment, a large range of ECB is used, small batches of products are required. In turn, the ECB must have high reliability and fault tolerance, provide long-term operation in extreme external conditions, including an extended temperature range, a variety of radiation effects. In addition, long-term support for ECB production and guaranteed absence of "bookmarks", that is, undocumented hardware or software instructions that can lead to failure, non-execution of commands or unauthorized data transfer, are required.

**Keywords:** electronic component base, radio-electronic equipment, import substitution.

#### Data of authors:

Gennady Yakovlevich Krasnikov, academician of Russian Academy of Sciences, doctor of Engineering Sciences, Professor, «Molecular Electronic Research Institute» Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: gkrasnikov@niime.ru

Enns Viktor Ivanovich, Ph.D. in Engineering Science; Associate Professor, JSC «NIIME»; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1 Akademika Valieva street, e-mail: venns@niime.ru.

**АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.****Часть 4. Температурные зависимости скоростей осаждения и плотности пленок**

В четвертой части обзора проанализированы данные по температурным зависимостям скоростей роста и плотности тонких пленок диоксида кремния (ТПДК) при атомно-слоевом осаждении с термической и плазменной активацией (ТА-АСО и ПА-АСО) и использованием различных реагентов-предшественников. Выделены характерные температурные диапазоны, в которых наблюдаются принципиальные отличия ростовых характеристик при ПА-АСО и ТА-АСО, а также плотности ТПДК.

**Ключевые слова:** диоксид кремния, тонкая пленка, атомно-слоевое осаждение, 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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЫШЬЯКА И ФОСФОРА В СИЛЬНОЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ**

В работе исследованы распределения As в *p-n*-структурах, формируемых в сильнолегированном кремнии КДБ0.001 (концентрация  $1,3 \times 10^{-20} \text{ см}^{-3}$ ) диффузией As в эвакуированной ампуле. Использовались методы дифференциальной проводимости и нейтронно-активационный. Выявлено существенное различие распределений, что объясняется наличием части As в диффузионном слое в электрически неактивной форме в виде нейтральных кластеров вакансионного типа  $V_SAs_2$ . Параллельно исследованиям профилей As исследованы профили распределения в кремнии КДБ0.001 фосфора, полученные диффузией в газовой фазе с источником в виде треххлористого фосфора  $PCl_3$  в аналогичном по температуре и времени режиме диффузии.

Полученные активационные профили распределения As и P служат наглядным подтверждением преимуществ выбора донорной примеси As относительно других легирующих примесей для формирования в сильно легированном кремнии низковольтных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя (напряжение пробоя  $U_{\text{проб}} < 6 \text{ В}$ ), на основе которых изготавливаются низковольтные стабилитроны и ограничители напряжения. Критерии сравнения: соотношение поверхностных концентраций –  $N_s$  мышьяка  $\approx 1 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_s$  фосфора  $\approx 1,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , глубины залегания *p-n*-переходов –  $x_j$  мышьяка  $\approx 2 \text{ мкм}$ ,  $x_j$  фосфора  $\approx 1 \text{ мкм}$ , соответственно.

**Ключевые слова:** профиль распределения примеси в кремнии, *p-n*-переход, мышьяк, фосфор, сильно легированный кремний.

**Сведения об авторе:**

Скорняков Станислав Петрович, кандидат технических наук, Новосибирский Завод Полупроводниковых Приборов с Особым Конструкторским Бюро, Россия, 630082, Новосибирск, Дачная, 60, e-mail: skornyakov@nzpp.ru

**ATOMIC LAYER DEPOSITION OF SILICON DIOXIDE THIN FILMS FOR MICRO- AND NANOELECTRONICS.****Part 4. Temperature dependencies of deposition rates and films densities**

In the fourth part of the review, data on the temperature dependencies of the growth rates and density of thin silicon dioxide films during atomic layer deposition with thermal and plasma activation (TA-ALD and PA-ALO) with the use of various precursors are analyzed. The characteristic temperature ranges have been identified, in which there are fundamental differences in the growth characteristics for PA-ALD and TA-ALD, as well as the density of  $SiO_2$ .

**Keywords:** silicon dioxide, thin film, atomic layer deposition, temperature dependencies, deposition rate, film density.

**Data of author:**

Vladislav Yurievich Vasilyev, 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

**INVESTIGATION OF THE DIFFUSION PROFILES OF THE DISTRIBUTION OF ARSENIC AND PHOSPHORUS IN HIGHLY DOPED SILICON**

The As distributions in *p-n*-structures formed in strongly doped silicon KDB 0.001 (concentration  $1,3 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-3}$ ) by As diffusion in an evacuated ampoule were studied by differential conductivity and neutron activation methods. Their significant difference is revealed, which is explained by the presence of a part of As in the diffusion layer in an electrically inactive form in the form of neutral clusters of the vacancy type  $V_SAs_2$ . In parallel with the studies of the As profiles, the profiles of the distribution of phosphorus in silicon KDB 0.001 obtained by diffusion in the gas phase with a source in the form of phosphorus trichloride  $PCl_3$  in a similar temperature and time diffusion mode were studied. The obtained activation profiles of the distribution of As and P serve as a clear confirmation of the advantages of choosing the donor impurity As relative to other alloying impurities for the formation of low-voltage *p-n*-structures in highly doped silicon with tunnel and mixed breakdown mechanisms (breakdown voltage  $U_{\text{проб}} < 6 \text{ V}$ ), on the basis of which low-voltage zener diodes and voltage limiters are manufactured. Comparison criteria: the ratio of surface concentrations –  $N_s$  arsenic  $\approx 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_s$  phosphorus  $\approx 1,6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , the depth of occurrence of *p-n*-junctions –  $x_j$  arsenic  $\approx 2 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $x_j$  phosphorus  $\approx 1 \text{ }\mu\text{m}$ , respectively.

**Keywords:** impurity distribution profile in silicon, *p-n*-junction, arsenic, phosphorus, strongly doped silicon.

**Data of author:**

Skornyakov Stanislav Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Semiconductor Devices, Novosibirsk Semiconductor Devices Plant with a Special Design Bureau, Novosibirsk, 60, Dachnaya, 630082, Russia, e-mail: skornyakov@nzpp.ru

### ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА СБИС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Статья посвящена актуальным вопросам необходимости анализа условий проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий. В работе выделяются особенности формирования информационно-аналитической модели, ее структуры, состава данных, принципов систематизации, приведены примеры реализации и показаны возможности развития, позволяющие проводить независимый анализ с целью выделения приоритетных областей для решения оптимизационных задач участников цепочек создания ценности.

**Ключевые слова:** информационно-аналитическая модель, базовая технология, СБИС, маршрут проектирования, результативность проектирования.

#### Сведения об авторе:

Королева Анна Николаевна, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, д. 12, стр. 1, e-mail: akoroleva@niime.ru

### ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОТЖИГОВ НА ПАРАМЕТРЫ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДОВ

Исследовано влияние низкотемпературных (НТ) отжигов в диапазоне температур (400...950) °С на электрические параметры низковольтных  $p$ - $n$ -структур, формируемых высококонцентрационной диффузией мышьяка из неограниченного источника в условиях эвакуированной кварцевой ампулы. Показано, что в зависимости от температуры отжига напряжение пробоя  $p$ - $n$ -структур ( $U_{\text{проб}}$ ) можно как повышать, так и снижать на некоторую величину.

Наблюдаемый эффект объясняется наличием легирующей примеси, в данном случае As, в высококонцентрационном диффузионном слое не только в активной, но и в пассивной формах – в виде метастабильных кластеров, которые могут быть частично активированы в результате НТ отжигов. Эффект НТ трансформации кластеров имеет обратимый характер и может быть использован в интересах производства низковольтных прецизионных стабилитронов для тонкой коррекции величины напряжения пробоя ( $U_{\text{проб}}$ ) НВ  $p$ - $n$ -структур. Корректировка величины  $U_{\text{проб}}$  может быть проведена как на стадии изготовления пластин с НВ  $p$ - $n$ -структурами, так и стабилитронов в стеклянных корпусах, изготовленных на основе НВ  $p$ - $n$ -структур.

**Ключевые слова:** низковольтный  $p$ - $n$ -переход, кластеры, низкотемпературный отжиг.

#### Сведения об авторе:

Скорняков Станислав Петрович, кандидат технических наук, Новосибирский завод Полупроводниковых Приборов с Особым Конструкторским Бюро, Россия, 630082, Новосибирск, Дачная, 60, e-mail: skorniyakov@nzpp.ru

### INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT OF VLSI DESIGN AND PRODUCTION PROCESSES USING BASIC TECHNOLOGIES

The article is devoted to topical issues of the need to analyze the conditions for the design and production of VLSI using basic technologies. The paper highlights the features of the formation of an information and analytical model, its structure, data composition, principles of systematization, examples of implementation are given and development opportunities are shown, that allow an independent analysis to be carried out in order to highlight priority areas for solving optimization problems of participants in value chains.

**Keywords:** information and analytical model, basic technology, VLSI, design route, design efficiency.

#### Data of author:

Koroleva Anna Nikolaevna, JSC MERI; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1, Akademika Valieva street, e-mail: akoroleva@niime.ru

### EFFECT OF LOW-TEMPERATURE ANNEALING ON THE PARAMETERS OF LOW-VOLTAGE DIFFUSION $p$ - $n$ -TRANSITIONS

The influence of low-temperature (LT) annealing in the temperature range (400...950) °C on the electrical parameters of low-voltage  $p$ - $n$ -structures formed by high-concentration diffusion of arsenic into highly doped silicon under the conditions of an evacuated quartz ampoule is studied. It is shown that, depending on the annealing temperature, the breakdown voltage of  $p$ - $n$ -structures ( $U_{\text{проб}}$ ) can be either increased or reduced by a certain amount.

The observed effect is explained by the presence of an alloying impurity, in this case As, in the highly concentrated diffusion layer not only in the active, but also in the passive forms – in the form of metastable clusters, which can be partially activated as a result of LT annealing. The effect of LT transformation of clusters is reversible and can be used in the interests of the production of precision low-voltage zener diodes for fine correction of the breakdown voltage ( $U_{\text{проб}}$ ) LV of  $p$ - $n$ -structures. Correction of the  $U_{\text{проб}}$  value can be carried out both at the stage of manufacturing plates with LV  $p$ - $n$ -structures, and zener diodes in glass cases made on the basis of LV  $p$ - $n$ -structures.

**Keywords:** low-voltage  $p$ - $n$ -junction, clusters, low-temperature annealing.

#### Data of author:

Skorniyakov Stanislav Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Semiconductor Devices, Novosibirsk Semiconductor Devices Plant with a Special Design Bureau, Novosibirsk, 60, Dachnaya, 630082, Russia, e-mail: skorniyakov@nzpp.ru

**БАРЬЕРНЫЕ СВОЙСТВА ОСТАТОЧНОГО ОКСИДА КРЕМНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ  $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДОВ ДИФфуЗИЕЙ МЫШЬЯКА В СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫЙ КРЕМНИЙ**

Исследовано негативное влияние толщины остаточного/естественного оксида кремния ( $\text{SiO}_{2\text{ост}}$ ) в «окнах» защитного оксида кремния на результаты формирования низковольтных планарных  $p$ - $n$ -структур высококонцентрационной диффузией As в сильнолегированный кремний в условиях эвакуированной кварцевой ампулы: величину и воспроизводимость величины напряжения пробоя ( $U_{\text{проб}}$ )  $n$ - $p$ -переходов от процесса к процессу. Показано, что  $\text{SiO}_{2\text{ост}}$  толщиной свыше  $\square 50 \text{ \AA}$  – практически непреодолимый барьер для достижения атомами мышьяка поверхности кремния, диффузии As в кремний. Для получения удовлетворительных результатов по величине и воспроизводимости величины электрических параметров низковольтных планарных  $p$ - $n$ -структур, получаемых диффузией As из неограниченного источника в условиях эвакуированной ампулы, толщина  $\text{SiO}_{2\text{ост}}$  не должна превышать  $\square 25 \text{ \AA}$ . Предложены технологические решения по ограничению толщины  $\text{SiO}_{2\text{ост}}$ .

**Ключевые слова:** остаточный оксид кремния, диффузия мышьяка, низковольтный  $p$ - $n$ -переход.

**Сведения об авторе:**

Скорняков Станислав Петрович, кандидат технических наук,  
Новосибирский завод Полупроводниковых Приборов с Особым  
Конструкторским Бюро, Россия, 630082, Новосибирск, Дачная, 60,  
e-mail: skorniyakov@nzpp.ru

**BARRIER PROPERTIES OF RESIDUAL SILICON OXIDE IN THE FORMATION OF LOW-VOLTAGE  $p$ - $n$ -JUNCTIONS BY THE DIFFUSION OF ARSENIC INTO HIGHLY ALLOYED SILICON**

The negative effect of the thickness of the residual/natural silicon oxide ( $\text{SiO}_{2\text{res}}$ ) in the "windows" of the protective silicon oxide on the results of the formation of low-voltage planar  $p$ - $n$ -structures by high-concentration diffusion of As into highly doped silicon under the conditions of an evacuated quartz ampoule: the magnitude and reproducibility of the breakdown voltage ( $U_{\text{проб}}$ )  $n$ - $p$ -transitions from process to process. It is shown that  $\text{SiO}_{2\text{res}}$  with a thickness of more than  $\square 50 \text{ \AA}$  is an almost insurmountable barrier for arsenic atoms to reach the silicon surface, As diffusion into silicon. In order to obtain satisfactory results on the magnitude and reproducibility of the electrical parameters of low-voltage planar  $p$ - $n$ -structures obtained by As diffusion from an unlimited source under evacuated ampoule conditions, the thickness of  $\text{SiO}_{2\text{res}}$  should not exceed  $\square 25 \text{ \AA}$ . Technological solutions for limiting the thickness of  $\text{SiO}_{2\text{res}}$  are proposed.

**Keywords:** residual silicon oxide, arsenic diffusion, low-voltage  $p$ - $n$ -junction.

**Data of author:**

Skorniyakov Stanislav Petrovich, Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Department of Semiconductor Devices,  
Novosibirsk Semiconductor Devices Plant with a Special Design Bureau,  
Novosibirsk, 60, Dachnaya, 630082, Russia,  
e-mail: skorniyakov@nzpp.ru

**ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА  
«СПЕЦИАЛИСТ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ»**

В работе рассматриваются 6-й и 7-й уровни квалификации персонала, соответствующие по своим характеристикам виду трудовой деятельности «инженер-технолог». Представлены разработанные функциональные карты видов профессиональной деятельности в условиях современного производства изделий микроэлектроники инженеров-технологов и инженеров-интеграторов, а также главных специалистов, ведущих инженеров-технологов, руководителей группы и начальников лабораторий. Рассмотрены характеристики обобщенных трудовых функций для каждого из указанных видов профессиональной деятельности, включая трудовые действия, необходимые умения и знания.

**Ключевые слова:** трудовая функция, квалификационный уровень, карта вида профессиональной деятельности, инженер-технолог, производство изделий микроэлектроники.

**Сведения об авторах:**

Кирюшина Ирина Васильевна, кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1, e-mail: ikiryushina@niime.ru

Поликarpova Лилиана Владимировна, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1, e-mail: lpolikarpova@niime.ru

Забодаева Нина Николаевна, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1, e-mail: nzabodaeva@niime.ru

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

**«NANOSCALE SEMICONDUCTOR DEVICES AND INTEGRATED CIRCUITS  
TECHNOLOGY SPECIALIST» PROFESSIONAL STANDARD DEVELOPMENT  
SUPPOSITIONS**

In this paper we present investigations concerning the sixth and seventh staff qualification levels suitably matched to the "operator" job in accordance with level a process engineer characteristics. Developed functional cards of the form of professional practices in the state-of-the-art microelectronic manufacture for the process engineers, integrators and chief specialists, senior process engineers, group supervisors and heads of laboratory as well are introduced. Generalized labor functions' characteristics for each above-mentioned forms of professional practices including working activities, necessary working skills and expertise are described.

**Keywords:** labour function, qualification level, kind of operation card, process engineer and microelectronic production.

**Data of authors:**

Kiryushina Irina Vasilevna, candidate of engineering Sciences, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Akademika Valieva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: ikiryushina@niime.ru

Polikarpova Liliانا Vladimirovna, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Akademika Valieva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: lpolikarpova@niime.ru

Zabodaeva Nina Nikolaevna, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Akademika Valieva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: nzabodaeva@niime.ru

Nuykin Andrey Valeryevich; "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, Akademika Valieva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: anuykin@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 30.04.2021.

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»  
(Типография «Наука»)  
121099, Москва, Шубинский пер., 6  
Заказ № 55  
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 возвра-  
щаются. 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>