



# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

## **СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 2(178) 2020

---

# **ELECTRONIC ENGINEERING**

## **SERIES 3 MICROELECTRONICS**

Scientific & Technical Journal

Выпуск 2(178) 2020

Москва, 2020



## «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»

### Редакционный совет Главный редактор

Красников Г. Я., д. т. н.,  
академик РАН

### Члены редакционного совета

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.

Горбачев А. А. д. ф.-м. н.,  
академик РАН

Горнев Е. С., д. т. н.,  
член-корреспондент РАН,  
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.

Петричкович Я. Я., д. т. н.

Сигов А. С., д. ф.-м. н.,  
академик РАН

Стемпковский 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

### Н.А. Шелепин

Особенности технологии и конструкции элементов СБИС СОЗУ  
с технологическим уровнем 90 нм для бортовой космической  
аппаратуры ..... 5

### С.В. Волобуев, В.Г. Рябцев

Особенности архитектуры отказоустойчивого запоминающего  
устройства ..... 9

## Процессы и технология

### В.Ю. Васильев

Конформность роста тонких слоев из газовой фазы на рельефных  
микро- и наноструктурах. Часть 1. Проблематика и методология  
оценки роста слоев на рельефах ..... 16

### В.Н. Панасюк, А.Н. Королева, П.В. Игнатов, Д.С. Шипицин

Проблемы и задачи системы управления изменениями базовых  
технологий микроэлектроники ..... 26

## Свойства материалов

### А.А. Конарев, Д.А. Варламов, Б.Г. Грибов

Получение концентрата тетраметиламмония гидроксида с  
использованием различных катионообменных мембран ..... 35

## Математическое моделирование

### Е.Ю. Чугунов, С.П. Тимошенко, А.И. Погалов, Д.В. Вертянов

Конструирование и расчеты трехмерных микроэлектронных  
модулей с высокой степенью интеграции компонентов ..... 42

### А.И. Погалов, А.Ю. Титов, Ю.Г. Долговых

Проектирование и инженерный расчет тепловых и прочностных  
характеристик функционального микро модуля ..... 49

## Надежность

### Л.В. Поликарпова, И.В. Кирюшина, Н.Н. Забодаева,

### С.Н. Максимов

Функциональный анализ деятельности операторов жидкостного  
прецизионного травления, прецизионной фотолитографии  
и элионных процессов в высокотехнологичных производствах  
изделий микроэлектроники ..... 53

**Аннотации** ..... 68

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

**Editorial Council  
Chief Editor**

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

**The Members of Editorial Council**

**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.,

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.

**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**

📍 1-st Zapadny 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**

**N.A. Shelepin**

Features of the technology and design of VLSI elements SOZU  
with a technological level of 90 nm for spacecraft ..... 5

**S.V. Volobuev, V.G. Ryabtsev**

Features of the fault-tolerant storage device architecture ..... 9

**Processes and Technology**

**V.Yu. Vasilyev**

Conformality of thin layers growth on relief micro- and nanostructures.  
Part 1. Issues and methodology for evaluation of layer growth  
on reliefs ..... 16

**V.N. Panasyuk, A.N. Koroleva, P.V. Ignatov, D.S. Shipitsin**

Problems and tasks of the management system of changes  
in basic technologies of microelectronics ..... 26

**Properties of Materials**

**A.A. Konarev, D.A. Varlamov, B.G. Gribov**

Production of tetramethylammonium hydroxide concentrate using  
different cation-exchange membranes ..... 35

**Mathematical Simulation**

**E.Y. Chugunov, S.P. Timoshenkov, A.I. Pogalov,**

**D.V. Vertyanov**

Design and calculation of three-dimensional microelectronic modules  
with a high degree of component integration ..... 42

**A.I. Pogalov, A.Yu. Titov, Yu.G. Dolgovykh**

Designing and engineering calculation of heat and strength  
characteristics of functional micromodule ..... 49

**Reliability**

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

**S.N. Maximov**

Functional analysis of precision wet etching, precision photo  
lithography and electron-ion beam processes operators’ practices  
in the high-technology microelectronic productions ..... 53

**Abstracts** ..... 68

The journal has included in the number of publications recommended  
for publication of articles by applicants for academic degrees of candidate  
and doctor of Sciences №1969 by the all-Russian attestation Commission (НАС)

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СБИС СОЗУ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ УРОВНЕМ 90 НМ ДЛЯ БОРТОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Рассмотрены проблемы, возникшие при разработке СБИС СОЗУ для бортовой космической аппаратуры на основе КМОП технологии с уровнем 90 нм. СОЗУ 16 Мбит, разработанное на основе лицензированной базовой технологии и правил проектирования, имело весьма низкую устойчивость к воздействию одиночных космических частиц. Величина линейных потерь энергии (ЛПЭ) составила всего 3 МэВ·см<sup>2</sup>/мг (т.е. защелка наступала от самой маленькой частицы – Ne). При помощи компьютерного моделирования были разработаны новые правила проектирования и осуществлено проектирование новой микросхемы. В результате значение ЛПЭ составило 80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг (т.е. максимального значения, которое могло быть получено при испытаниях – воздействие Хе). При этом температурный диапазон увеличен до +125 °С и напряжение питания изменено с 2,5 до 3,3 В. Таким образом, экспериментально показана возможность создания и производства СБИС высокой степени интеграции, соответствующих требованиям бортовой космической аппаратуры на основе базовой технологии уровня 90 нм, освоенной в ПАО «Микрон».

**Ключевые слова:** КМОП СБИС, СОЗУ, ЛПЭ, RHbD, защелка.

#### Сведения об авторе:

*Шелепин Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 12, стр. 1, e-mail: nchelepin@niime.ru*

### ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Предлагается архитектура отказоустойчивого оперативного запоминающего устройства, содержащего три канала модулей памяти со встроенными средствами самотестирования и саморемонта. Первый модуль обрабатывает системные данные, второй модуль работает в режиме зеркального отображения данных, третий модуль работает в режиме самотестирования. При отказе первого канала происходит подключение к системе второго работоспособного канала. Третий канал переключается в режим зеркального отображения данных, а работоспособность первого канала восстанавливается.

**Ключевые слова:** зеркалирование памяти, многократные отказы, средства самотестирования и саморемонта.

#### Сведения об авторах:

*Волобуев Сергей Васильевич, Волгоградский государственный аграрный университет, Российская Федерация, 400002, Южный федеральный округ, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26, e-mail: sergey-aspir14@yandex.ru*

*Рябцев Владимир Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный аграрный университет, Российская Федерация, 400002, Южный федеральный округ, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26, e-mail: akim.onoke@mail.ru*

### КОНФОРМНОСТЬ РОСТА ТОНКИХ СЛОЕВ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА РЕЛЬЕФНЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРАХ.

#### Часть 1. Проблематика и методология оценки роста слоев на рельефах

Выполнен обзор информационных источников по результатам многолетних исследований проблемы конформности роста тонких слоев неорганических материалов на рельефных полупроводниковых подложках при химическом осаждении из газовой фазы. В первой части рассматриваются общие вопросы, исторический аспект проблемы, методология анализа конформности.

**Ключевые слова:** конформность, неорганические материалы, рельефные полупроводниковые подложки.

#### 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*

### FEATURES OF THE TECHNOLOGY AND DESIGN OF VLSI ELEMENTS SOZU WITH A TECHNOLOGICAL LEVEL OF 90 NM FOR SPACECRAFT

The problems that arose during the development of VLSI SRAM for spacecraft using the technology with a node 90 nm are considered. SRAM 16 Mbit developed based on licensed basic technology and design rules, it had very low resistance to single space particles. The value of linear energy loss (LPE) was only 3 MeV·cm<sup>2</sup>/mg. Using computer modeling, new design rules were developed and a new chip was designed. As a result, the LPE value was 80 MeV·cm<sup>2</sup>/mg. The temperature range is increased to +125 grades and the power supply voltage is changed from 2.5 to 3.3 V. Thus, the possibility of creating and manufacturing VLSI of a high degree of integration that meets the requirements of onboard space equipment based on the basic technology of the level of 90 nm, mastered at PJSC «Micron», has been experimentally shown.

**Keywords:** CMOS, VLSI, RAM, LINEAR ENERGY LOSS, RHbD, LATCH.

#### Data of the author:

*Nikolai Alekseevich Shelepin, Doctor of engineering; professor of the department of integral electronics and microsystems at MIET, Molecular Electronics Research Institute, Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva ulitsa, 12/1, e-mail: nchelepin@niime.ru*

### FEATURES OF THE FAULT-TOLERANT STORAGE DEVICE ARCHITECTURE

The architecture of a fault-tolerant RAM containing three channels of memory modules with built-in self-testing and self-repair tools is proposed. The first module processes system data, the second module operates in data mirroring mode, and the third module operates in self-testing mode. If the first channel fails, the second working channel is connected to the system. The third channel switches to data mirroring mode, and the first channel is restored.

**Keywords:** memory mirroring, multiple failures, self-testing and self-repair tools.

#### Data of authors:

*Volobuev Sergey Vasilievich, Volgograd State Agrarian University, pr. Universitetskyy, 26, pr. Universitetskyy, Volgograd, Volgograd Region, Southern Federal District, Russian Federation, 400002, e-mail: sergey-aspir14@yandex.ru*

*Ryabtsev Vladimir Grigorievich, doctor of technical sciences, professor, Volgograd State Agrarian University, pr. Universitetskyy, 26., pr. Universitetskyy, Volgograd, Volgograd Region, Southern Federal District, Russian Federation, 400002, e-mail: akim.onoke@mail.ru*

### CONFORMALITY OF THIN LAYERS GROWTH ON RELIEF MICRO- AND NANOSTRUCTURES.

#### Part 1. Issues and methodology for evaluation of layer growth on reliefs

A review of information sources is performed on the results of prolonged research on the thin layer conformality problem during chemical vapor deposition of inorganic materials on relief semiconductor substrates. The first part deals with general issues, the historical aspect of the problem, and the methodology for conformality analysis.

**Keywords:** conformality, inorganic materials, relief semiconductor substrates.

#### Data of the author:

*Vladislav Yurievich Vasilev, 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*

### ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯМИ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Статья посвящена актуальным вопросам необходимости управления изменениями базовых технологий. Авторами выделяются особенности управления изменениями при реализации базовых технологий на основании обобщения практического опыта, приведены данные об изменениях, идентифицированы основные риски, их влияние на макропроцесс проектирования и производства СБИС, предложены способы управления рисками для повышения результативности создания новой продукции.

**Ключевые слова:** базовая технология, управление изменениями, модели, DRM, СБИС, результативность проектирования.

#### Сведения об авторах:

*Панасюк Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии проблем качества, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 12, стр. 1, e-mail: vpanasyuk@niime.ru*

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

*Игнатов Павел Викторович, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460 Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 12, стр. 1, e-mail: paignatov@niime.ru*

*Шипицын Дмитрий Святославович, кандидат физико-математических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 12, стр. 1, e-mail: dshipitsin@niime.ru*

### ПОЛУЧЕНИЕ КОНЦЕНТРАТА ТЕТРАМЕТИЛАММОНИЯ ГИДРОКСИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ КАТИОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН

В работе представлены результаты применения различных катионообменных мембран для получения концентрата тетраметиламмония гидроксида. Показано, что для получения концентрата тетраметиламмония гидроксида могут быть использованы только перфорированные катионообменные мембраны, которые характеризуются высокой химической стойкостью, механической прочностью, селективностью и сравнительно низким электроосмотическим переносом воды, что обеспечивает получение продукта требуемого качества. Исключением является мембрана МФ-4СК-100, на которой достигаются более низкие выходы продукта по веществу (76,0–85,0%) и по току (15,0–22,9%). Для разработки технологии получения концентрата тетраметиламмония гидроксида рекомендуются мембраны Нафюн 324 и Флемин 811.

**Ключевые слова:** тетраметиламмоний гидроксид, хлорид тетраметиламмония, катионообменные мембраны: МК-40, МФ-4СК-100, Нафюн 324, Флемин 811.

#### Сведения об авторах:

*Конарев Александр Андреевич, доктор технических наук, Научно-исследовательский институт полупродуктов и красителей, 141701, г. Долгопрудный Московской области, Лихачевский проезд, д. 7, e-mail: lab32@niopik.ru*

*Варламов Денис Александрович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1, e-mail: dvarlamov@niime.ru*

*Грибов Борис Георгиевич, доктор химических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1*

### PROBLEMS AND TASKS OF THE MANAGEMENT SYSTEM OF CHANGES IN BASIC TECHNOLOGIES OF MICROELECTRONICS

The article is devoted to topical issues of the need to manage changes in basic technologies. The authors highlight the features of change management in the implementation of basic technologies based on a synthesis of practical experience, provide data on the changes, identify the main risks, their impact on the macro design process and production of VLSI, offer risk management methods to increase the efficiency of creating new products.

**Keywords:** basic technology, change management, models, DRM, VLSI, design performance.

#### Data of authors:

*Panasjuk Vitaly Nikolaevich, doctor of technical Sciences, Professor, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, Akademika Valieva Ulitsa, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: vpanasyuk@niime.ru*

*Koroleva Anna Nikolaevna, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, Akademika Valieva Ulitsa, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: akoroleva@niime.ru*

*Ignatov Pavel Viktorovich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, Akademika Valieva Ulitsa, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: paignatov@niime.ru*

*Shipitsin Dmitry Svyatoslavovich, candidate of physical and mathematical Sciences, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, Akademika Valieva Ulitsa, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: dshipitsin@niime.ru*

### PRODUCTION OF TETRAMETHYLAMMONIUMHYDROXIDE CONCENTRATE USING DIFFERENT CATION-EXCHANGE MEMBRANES

The research paper shows the results of using various cation-exchange membranes to produce a tetramethylammonium hydroxide concentrate. It is shown that producing a tetramethylammonium hydroxide concentrate can only be provided by using perforated cation-exchange membranes which are characterized by a high chemical resistance, mechanical durability, selectivity and relatively low electroosmotic water transfer – they all together ensure producing the product of the required quality. An exception is the MF-4SK-100 membrane which provides lower yields on the substance (76.0–85.0%) and on the current (15.0–22.9%). The Nafion 324 and Flemion 811 membranes are recommended to develop a technology for producing a tetramethylammonium hydroxide concentrate.

**Keywords:** tetramethylammonium hydroxide, tetramethylammonium chloride, cation-exchange membranes: MK-40, MF-4SK-100, Nafion 324, Flemion 811.

#### Data of authors:

*Konarev Alexandr Andreevich, doctor of technical sciences, Science and Research Institute of Organic Intermediates and Dyes, 7, Likhachevsky proezd, Moscow region, Dolgoprudny, 141701, e-mail: lab32@niopik.ru*

*Varlamov Denis Alexandrovich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Akademika Valieva street, 12/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: dvarlamov@niime.ru*

*Gribov Boris Georgievich, doctor of chemical Sciences, Professor, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, Akademika Valieva street, 12/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia*

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТЫ ТРЕХМЕРНЫХ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ИНТЕГРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ

В статье представлены прогрессивные и эффективные решения по созданию трехмерных МЭМ с высокой степенью интеграции компонентов на основе гибких, а также кремниевых коммутационных плат. Обосновано применение компьютерно-интегрированного моделирования с использованием метода конечных элементов для проектирования и расчетов МЭМ в трехмерном исполнении. Выполнена аппроксимация конструкций и разработаны унифицированные компьютерные модели трехмерных МЭМ на основе метода конечных элементов, пригодные для изучения различных конструктивно-технологических вариантов изделий и воздействий на них. Проведено моделирование трехмерных МЭМ для изучения влияния свойств материалов, конструктивных параметров и внешних воздействий на напряженно-деформированное состояние и механическую прочность изделий. Даны рекомендации по проектированию трехмерных МЭМ с высокой степенью интеграции компонентов. Полученные результаты показали, что напряженно-деформированное состояние МЭМ определяется свойствами применяемых материалов и зависит от механической прочности и жесткости элементов и соединений, обусловленных модулями упругости материалов в сопряжениях. Для снижения напряжений в трехмерных МЭМ необходимо использование более жестких конструктивных материалов, обладающих близкими характеристиками прочности и несущей способностью, а клеевые материалы выбирать, исходя из условий эксплуатации, характера и величины воздействий. Проведение инженерных расчетов с разработкой научно-технических рекомендаций по повышению устойчивости создаваемых изделий к внешним воздействиям позволяет проектировать трехмерные МЭМ с высокими тактико-техническими показателями, обеспечивая требуемые характеристики и надежность функционирования изделий.

**Ключевые слова:** трехмерный микроэлектронный модуль, проектирование трехмерного модуля, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

#### Сведения об авторах:

Чугунов Евгений Юрьевич, аспирант Института нано- и микросистемной техники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: chugunov-eu@inbox.ru;

Тимошенко Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: spt@miee.ru;

Поголов Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор; профессор Института нано- и микросистемной техники Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: dtm@miee.ru;

Вертянов Денис Васильевич; аспирант Института нано- и микросистемной техники Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: vdv.vertyanov@gmail.com.

### DESIGN AND CALCULATION OF THREE-DIMENSIONAL MICROELECTRONIC MODULES WITH A HIGH DEGREE OF COMPONENT INTEGRATION

The article presents progressive and effective solutions for creating three-dimensional microelectronic modules (MEMs) with a high degree of component integration based on flexible and silicon interconnection boards. The use of computer-integrated modeling with the finite element method for design and calculation of three-dimensional MEMs is justified. The structures are approximated as accomplished and unified computer models of three-dimensional MEMs based on the finite element method are developed. These models are suitable for studying various structural and technological variants of MEMs and impacts on them. The three-dimensional MEMs was simulated to study the influence of properties of the materials, structural parameters and external influences on the stress-strain state and mechanical strength of products. Recommendations on the design of three-dimensional MEMs with a high degree of component integration are given. The results showed that the stress-strain state of the MEMs is determined by the properties of the materials used and depends on the mechanical strength and stiffness of the elements and joints due to the modulus of elasticity of the materials in the intersections. To reduce stresses in three-dimensional MEMs, it is necessary to use of the more stiffness structural materials with similar strength and load-bearing characteristics, and to choose adhesive materials based on operating conditions, the nature and magnitude of influences. Engineering calculations with the development of scientific and technical recommendations to increase the stability of created products to external influences allows to design three-dimensional MEMs with high tactical and technical indicators, providing the required characteristics and reliability of the products.

**Keywords:** three-dimensional microelectronic module, design of microelectronic module, computer modeling, finite-element method, stress-strain state.

#### Data of authors:

Chugunov Eugeny Yuryevich; postgraduate of Institute of Nano- and Microsystem Technology of National Research University of Electronic Technology, 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: chugunov-eu@inbox.ru;

Timoshenkov Sergey Petrovich; doctor of engineering, professor; director of Institute of Nano- and Microsystem Technology of National Research University of Electronic Technology, 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: spt@miee.ru

Pogalov Anatoly Ivanovich; doctor of engineering, professor; professor of Institute of Nano- and Microsystem Technology of National Research University of Electronic Technology, 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: dtm@miee.ru

Vertyanov Denis Vasilievich; postgraduate of Institute of Nano- and Microsystem Technology of National Research University of Electronic Technology, 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: vdv.vertyanov@gmail.com

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МИКРОМОДУЛЯ

Разработан ряд моделей функционального микро модуля с конечно-элементной дискретизацией. Показано, что самым напряженным материалом сборки является клеевой шов и кристалл кремния. Даны рекомендации по проектированию и выбору конструктивно-технологических параметров соединений микро модуля для решения задач эффективного теплоотвода, устойчивости к термоциклическим нагрузкам, расширению функциональных возможностей.

**Ключевые слова:** функциональный микро модуль, проектирование, моделирование, герметизация, соединения, напряженно-деформированное состояние, характеристики материалов.

#### Сведения об авторах:

Поголов Анатолий Иванович, профессор, доктор технических наук; Национальный исследовательский университет «Московский Институт Электронной Техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: dtm@miee.ru

Титов Андрей Юрьевич, Закрытое акционерное общество «НИИМП-Т», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 6, e-mail: s4f@rambler.ru

Долговых Юрий Геннадьевич; Закрытое акционерное общество «НИИМП-Т», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 6, e-mail: wise85@bk.ru

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ЖИДКОСТНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ, ПРЕЦИЗИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ И ЭЛИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В данной работе рассматриваются 3 и 4 уровни квалификации персонала, соответствующие по своим характеристикам виду трудовой деятельности «оператор». Представлены разработанные функциональные карты видов профессиональной деятельности в условиях современного производства изделий микроэлектроники операторов жидкостного прецизионного травления, прецизионной фотолитографии и элионных процессов. Рассмотрены характеристики обобщенных трудовых функций для каждого из указанных видов профессиональной деятельности, включая трудовые действия, необходимые умения и необходимые знания.

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

#### Сведения об авторах:

Поликарпова Лилиана Владимировна, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 12, строение 1, e-mail: lpolikarpova@niime.ru

Кiryushina 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

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

Максимов Сергей Николаевич, Публичное акционерное общество «Микрон», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: smaximov@mikron.ru

### DESIGNING AND ENGINEERING CALCULATION OF HEAT AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF FUNCTIONAL MICROMODULE

A number of functional micromodule models with finite element discretization have been developed. It is shown that the most stressed assembly material is an adhesive seam and a silicon crystal. Recommendations are given for the design and selection of structural and technological parameters of micromodule connections to solve the problems of effective heat removal, resistance to thermocyclic loads, and expansion of functional capabilities.

**Keywords:** functional micromodule, design, modeling, connections, stress-strain state, material characteristics.

#### Data of authors:

Pogalov Anatoliy Ivanovich, professor, doctor of technical sciences, National Research University of Electronic Technology, building 1, Shokin square, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: dtm@miee.ru

Titov Andrew Yurevich, Closed Joint-Stock Company «NIIMP-T», building 6, travel 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: s4f@rambler.ru

Dolgovykh Yuriy Gennadyevich; Closed Joint-Stock Company «NIIMP-T», building 6, travel 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: wise85@bk.ru

### FUNCTIONAL ANALYSIS OF PRECISION WET ETCHING, PRECISION PHOTO LITHOGRAPHY AND ELECTRON-ION BEAM PROCESSES OPERATORS' PRACTICES IN THE HIGH-TECHNOLOGY MICROELECTRONIC PRODUCTIONS

In this paper, we present investigations concerning the third and fourth staff qualification levels suitably matched to the "operator" job in accordance with level characteristics. Developed functional cards of the form of professional practices in the state-of-the-art microelectronic manufacture for precision wet etching, precision photolithography and electron-ion beam processes operators 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, operator, and microelectronic production.

#### Data of authors:

Polikarpova Liliانا Vladimirovna, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, Akademika Valieva street, 12/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: lpolikarpova@niime.ru

Kiryushina Irina Vasilevna, candidate of engineering Sciences, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Akademika Valieva street, 12/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: ikiryushina@niime.ru

Zabodaeva Nina Nikolaevna, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Akademika Valieva street, 12/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: nzabodaeva@niime.ru

Maximov Sergey Nikolaevich, «Mikron», Public joint-stock company, Akademika Valieva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: smaximov@mikron.ru

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

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

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.  
Подписано в печать 30.07.2020.

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»  
(Типография «Наука»)  
121099, Москва, Шубинский пер., 6

Тираж 500 экз. Цена договорная.

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

**ИЗДАТЕЛЬ**

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