



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 3(187) 2022

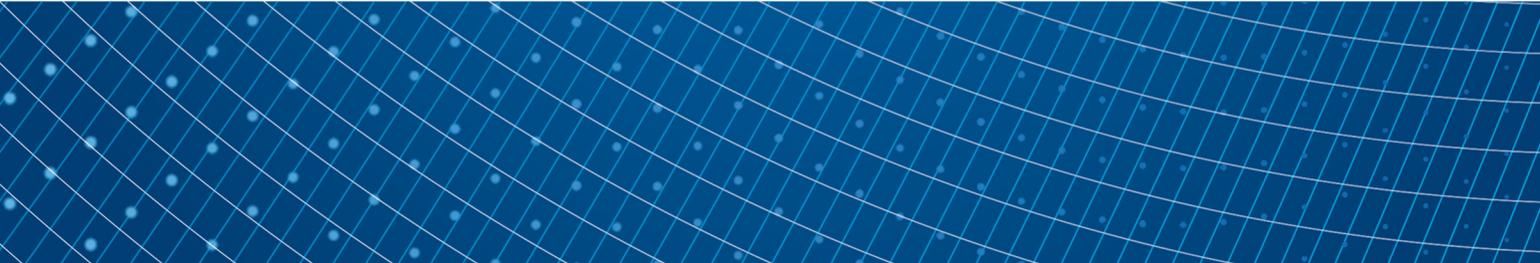
ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Выпуск 3(187) 2022

Москва, 2022



«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

Baklanov 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.**Горбачев Александр Алексеевич,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Горнев Евгений Сергеевич,

зам. главного редактора,

д. т. н., член-корреспондент РАН

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

д. т. н.

Рощупкин Дмитрий Валентинович,

д. ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Сигов Александр Сергеевич,

д. ф.-м. н., академик РАН

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

д. т. н., академик РАН

Шелепин Николай Алексеевич,

зам. главного редактора, д. т. н.

Эннс Виктор Иванович, д. т. н.**Адрес редакции**✉ Россия, 124460, Москва,
Зеленоград, улица Академика
Валиева, дом 6, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

УчредительАО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»**Слово редактора** 4**Физические явления****С.Э. Седлецкая, П.С. Воробьев, Е.А. Елисеичев**Проблема уязвимости микропроцессорных устройств релейной
защиты и автоматики к электромагнитным помехам 5**Разработка и конструирование****А.С. Кравцов**Принципы функционирования кэш-памяти в иерархических
компьютерных системах для работы с мультимедийными
приложениями. Часть 2 9**A.S. Kravtsov**Cache memory functioning principles in hierarchical computer
systems for working with multimedia applications. Part 2 16**В.Л. Евдокимов, С.И. Патюков**Метод аналитической оценки газораспределения для реактора
с индивидуальной обработкой подложек 23**Процессы и технология****М.В. Черняев, С.А. Горохов, С.И. Патюков, А.А. Резванов**

Кинетика радикального окисления кремния 31

А.Н. Беленков, В.А. Овчинников, С.И. Морозов, Н.С. ХрущевОпыт проектирования дизайна и изготовления сложных
прецизионных фотошаблонов с элементами компенсации
оптической близости OPC (Optical Proximity Correction) 45**Свойства материалов****В.Б. Яковлев, А.В. Бардушкин**Об использовании односточечных корреляционных приближений
для анализа диэлектрических характеристик композиционных
материалов микроэлектроники 51**Математическое моделирование****М.А. Королев, А.Ю. Красюков, Ю.А. Чаплыгин**Влияние конструктивно-технологических параметров
беспереходного моп-транзистора со слаболегированной рабочей
областью на обеднение канала прибора 55**М.А. Korolev, A.Yu. Krasukov, Y.A. Chaplygin**Chaplygin. Influence of the structural and process parameters
of a low-doped channel junctionless MOSFET on the device channel
depletion 66**Надёжность****В.Н. Панасюк, А.Н. Королева, П.В. Игнатов,****Д.С. Шипицин, А.Г. Потупчик**Отдельные аспекты анализа и оценки качества базовых
технологий с проектными нормами 180 и 90 нм в условиях
ограниченных ресурсов 77**Аннотации** 88Журнал 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., Sc. D.,

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

Bokarev V. P., Sc. D.,
Responsible Secretary

Bugaev A. S., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Bykov V. A., Sc. D.

Galiev G. B., Sc. D.

Gorbatshevich A. A., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Gornev E. S., Sc. D.,

Corresponding Member
of the RAS, Deputy Chief Editor

Kim A. K., Ph. D.

Kritenko M. I., Ph. D.

Maev Roman Gr., Sc. D.

Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.,

Roshchupkin D.V., Sc. D.

Corresponding Member of the RAS

Sigov A. S., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Stempkovskiy A. L., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Chaplygin Yu. A., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Shelepin N. A., Sc. D.,

Deputy Chief Editor

Enns V. I., Sc. D.

Editorial Staff Address

📍 6/1, Akademika Valieva street,
Zelenograd, Moscow 124460,
Russian Federation

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru
www.niime.ru/
zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

Founder

“Molecular Electronics Research
Institute”, Stock Company

Editor’s Column 4

Physical Phenomena

S.E. Sedlets kaya, P.S. Vorobyev, E.A. Eliseichev

The problem of vulnerability of microprocessor relay protection devices
to electromagnetic interferences 5

Development and Designing

A.S. Kravtsov

Cache memory functioning principles in hierarchical computer
systems for working with multimedia applications. Part 2 9; 16

V.L. Evdokimov, S.I. Patyukov

Method of analytical evaluation of gas distribution for a reactor
with individual substrate treatment 23

Processes and Technology

M.V. Chernyaev, S.A. Gorokhov, S.I. Patyukov, A.A. Rezmanov

Kinetics of radical oxidation of silicon 31

A.N. Belenkov, V.A. Ovchinnikov, S.I. Morozov, N.S. Khrushchev

Experience of design engineering and manufacturing of
complex precision photomask patterns applying optical proximity
correction (OPC) elements 45

Properties of Materials

V.B. Yakovlev, A.V. Bardushkin

On the use of single-point correlation approximations for the analysis
of the dielectric characteristics of microelectronics composite
materials 51

Mathematical Simulation

M.A. Korolev, A.Yu. Krasukov, Y.A. Chaplygin

Chaplygin. Influence of the structural and process parameters
of a low-doped channel junctionless MOSFET on the device channel
depletion 55; 66

Reliability

V.N. Panasyuk, A.N. Koroleva, P.V. Ignatov,

D.S. Shipitsin, A.G. Potupchik

Separate aspects of analysis and quality assessment of basic
technologies with design rates of 180 and 90 nm under conditions
of limited resources 77

Abstracts 88

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)

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед вами очередной 187-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

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

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

Номер открывается разделом «Физические явления», в котором рассматриваются основные преимущества и недостатки микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, а также проблема их высокой чувствительности к электромагнитным помехам: виды наиболее опасных помех и способы защиты от них.

В разделе «Разработка и конструирование» проведен предварительный анализ организации системы компьютерной памяти для разработки метода выбора оптимальных параметров кэш-памяти с точки зрения получения необходимого быстродействия, площади и энергопотребления при условии работы с мультимедийными данными. А во второй статье раздела рассмотрены условия формирования равномерного пограничного газового слоя концентрации реагента у подложки при подаче из инжекторов газораспределительной головки в реакторе газофазного нанесения пленок.

В следующем разделе «Процессы и технология» исследована кинетика радикального окисления кремниевой пластины в системе индивидуальной загрузки при проведении процесса окисления с генерацией пара у поверхности пластины (In Situ Steam-Generation – ISSG), основанном на сгорании водорода. Во второй статье представлен опыт разработки технологий проектирования диэлектрика и изготовления фотошаблона с элементами



компенсации эффектов оптической близости OPC (Optical Proximity Correction) для производства ИС с проектными нормами 130 нм с применением техники повышения разрешения RET (Reticle Enhancement Technique).

В разделе «Свойства материалов» представлен оригинальный вывод формул Ландау-Лифшица-Лооенга и Биира для вычисления эффективных диэлектрических характеристик композиционных материалов.

В разделе «Математическое моделирование» авторами представлен анализ развития МОП-транзисторов со встроенным каналом и показана перспективность приборов со слаболегированной рабочей областью.

В заключительном разделе «Надежность» авторами проведен анализ условий применения базовых технологий в РФ на основе собранных статистических данных, обуславливающих необходимость специальных методов мониторинга и анализа.

Приглашаем всех заинтересованных читателей к сотрудничеству!

С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН,

Г.Я. Красников

При этом наиболее сложным представляется вопрос трактовки полученных данных и последующие решения в части корректировок элементов базовой технологии, которые должны вырабатываться совместно с разработчиками базовой технологии, ведущими технологами, разработчиками моделей, PDK. Выбор варианта принятия решения должен строиться на оценке рисков всех участников цепочки, включая основного потребителя моделей и базовой технологии – разработчиков СБИС (дизайн-центров).

Возможные варианты и риски при их реализации представлены в табл. 1.

В практической плоскости реализация различных ситуаций, показанных на рис. 5–9, и возможных решений (табл. 1) может служить основой для поставки задач производственной линии, разработчикам моделей, а также в качестве дополнительной информации для дизайн-центров при использовании моделей в разработке конструкции СБИС.

Основное преимущество данных методов анализа заключается в их востребованности именно в условиях ограниченных ресурсов, когда, с одной стороны, по различным причинам организационно-экономического характера полная переэкстракция представляется нецелесообразной, а с другой – даже при полной переэкстракции сохраняется высокий риск потери актуальности полученных результатов при необходимости регулярных изменений поставщиков материалов и сред.

Во избежание развития подобного сценария, учитывая продолжающуюся тенденцию по поиску альтернативных поставщиков и связанную с этим потребность в разработке собственных материалов для критических операций микроэлектроники, необходимо на различных этапах учитывать ряд системных вопросов для поддержания качества базовой технологии на заданном уровне:

1. При разработке материалов или оценке альтернативных поставщиков на этапе технических требований целесообразно обеспечивать их преемственность с требованиями международных стандартов SEMI.

2. При выборе базовой технологии для оценки возможности замены поставщика (и на этапе внедрения новых материалов) руководствоваться:

- приоритетами минимальности проектных норм;
- оптимальной общности свойств элементной базы с другими БТ (проектная норма, количества уровней металлизации, напряжение питания и др.);
- востребованностью базовой технологии для производства различных типов СБИС.

3. При выборе СБИС, по параметрам которой оценивается поставщик, отдавать приоритет микросхемам с максимальной степенью интеграции.

4. Распространение положительных результатов оценки поставщика материалов на другие БТ производственной линии с аналогичной проектной нормой возможно до уровня 90 нм, при условии мониторинга и анализа уровня Ср, Срк тестовых структур по предложенному в данной статье алгоритму.

5. Для базовых технологий с проектными нормами менее 90 нм предусматривать дополнительный анализ с точки зрения проектирования фотошаблонов (анализ и коррекция адекватности ОРС-моделей).

При анализе качества базовых технологий необходимо обеспечивать системный подход, заключающийся в отслеживании причинно-следственных связей в замкнутом цикле проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий: «производственная линия – spice-модели (PDK) – конструкция СБИС – производственная линия (изготовление образцов)».

Таким образом, возникающие ограничения по доступности ресурсов ведут к необходимости существенного расширения объектов и методов мониторинга и анализа как со стороны производственной линии, так и со стороны разработчиков spice-моделей, фотошаблонов, дизайн-центров. А при проектировании конструкции СБИС, помимо стандартных процедур контроля перед проектированием ФШ, должны сравниваться результаты моделирования с использованием spice-моделей с результатами измерений образцов микросхем, что особенно важно в случаях несоответствия СБИС требованиям технического задания для снижения рисков многократных запусков в связи с корректировками конструкции кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Я., Игнатов П.В., Смирнов А.Н., Бутыгская М.В., Бокарев В.П.** Разработка базового технологического процесса изготовления цифро-аналоговых СБИС с проектными нормами 180 нм. Отчет о НИР № 10411.1006800.11.056 от 19.05.2010. (Минпромторг).
2. **Шелепин Н.А., Смирнов А.Н., Игнатов П.В., Егорова Т.Ю., Уланова А.В., Зайцев Н.А., Мещанов В.Д., Бокарев В.П.** Разработка базовой технологии изготовления радиационно-стойких однократно программируемых ПЗУ и ПЛИС. Отчет о НИР № 11411.1006800.11.267 от 29.11.2011 (Минпромторг).

3. **Красников Г.Я., Шелепин Н.А., Смирнов А.Н., Игнатов П.В., Бокарев В.П., Пастон В.В., Бутыгская М.В., Егорова Т.Ю., Шишанкина О.Н.** Разработка базовой технологии для создания расширенного ряда радиационно-стойких КМОП КНИ СБИС с проектными нормами 90 нм. Отчет о НИР (Минпромторг).
4. **Панасюк В.Н., Королева А.Н., Игнатов П.В., Шипицин Д.С.** Системы взаимодействия различных типов организаций разработчиков и изготовителей СБИС и проблемы создания результативных организационно-технических интерфейсов // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4(99). С. 166-168.
5. **Трифанихина И.Е., Надин А.С.** Методика аттестации командных файлов физической верификации с использованием квалификационных ячеек // Наноиндустрия. 2020. № S96-2. С. 717-720.
6. **Загидулина О.Р., Надин А.С.** Анализ «ложных» ошибок DRC при регрессионном тестировании командных файлов // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № S7(107). С. 817-818.
7. **Золотухин Ф.С., Надин А.С., Трифанихина И.Е.** Разработка прототипа программного модуля автоматизированной генерации квалификационных ячеек для контроля правил проектирования ИС // Наноиндустрия. 2020. № S96-2. С. 721-725.
8. **Кривенцев А.М., Потупчик А.Г., Шемякин А.В., Шамхалов А.Э.** Исследование методов верификации качества spice-моделей субмикронных МОП-транзисторов. // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № S7 (107). С. 868-869.
9. **Нуштаев А.В., Потупчик А.Г.** Особенности экстракции spice-моделей транзисторов для технологий КНИ глубокого субмикронного уровня // Наноиндустрия. 2020. № S96-2. С. 680-683.
10. **Шипицин Д.С., Потупчик А.Г., Шемякин А.В.** Архитектура spice-моделей ультрасовременных глубоко-субмикронных МОП-транзисторов // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 356-359.
11. **Панасюк В.Н., Королева А.Н., Игнатов П.В., Шипицин Д.С.** Проблемы и задачи системы управления изменениями базовых технологий микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2020. № 2. с. 26-34.
12. ГОСТ Р 50779.46-2012 Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса.

ПРОБЛЕМА УЯЗВИМОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОМЕХАМ

В статье рассматриваются основные преимущества и недостатки микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, а также проблема их высокой чувствительности к электромагнитным помехам: виды наиболее опасных помех и способы защиты от них.

Ключевые слова: релейная защита, электромагнитная помеха, микропроцессорные устройства защиты, импульсные помехи.

Сведения об авторе:

Седлецкая Светлана Эрнстовна, кандидат технических наук,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева (ВО РГТУ имени П.А. Соловьева), 152934, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53, e-mail: semsvet@mail.ru

Воробьев Павел Сергеевич, студент 2 курса магистратуры,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева (ВО РГТУ имени П.А. Соловьева), 152934, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53, e-mail: vorobps@gmail.com

Елисеичев Евгений Александрович, начальник сектора гражданской продукции

отдела главного конструктора Акционерное общество «Рыбинский завод приборостроения» (АО «РЗП»); старший преподаватель кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева (ВО РГТУ имени П.А. Соловьева), 152934, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53, e-mail: EvgenijEliseichev@yandex.ru

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КЭШ-ПАМЯТИ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ РАБОТЫ С МУЛЬТИМЕДИЙНЫМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ

Часть 2

В работе проведён предварительный анализ организации системы компьютерной памяти для разработки метода выбора оптимальных параметров кэш-памяти с точки зрения получения необходимого быстродействия, площади и энергопотребления при условии работы с мультимедийными данными.

Ключевые слова: кэш-память, процент попаданий, процент промахов, строка кэша, полностью ассоциативный кэш, наборно-ассоциативный кэш, кэш прямого отображения.

Сведения об авторе:

Кравцов Александр Сергеевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, e-mail: akravtsov@niime.ru

THE PROBLEM OF VULNERABILITY OF MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION DEVICES TO ELECTROMAGNETIC INTERFERENCES

The paper deals with the advantages and disadvantages of microprocessor-based relay protection and the problem of its vulnerability to electromagnetic interferences. The main types of electromagnetic interferences and ways of protection from them are analyzed.

Keywords: relay protection, electromagnetic interferences, microprocessor-based protection devices, pulse interference.

Data of author:

Sedletskaya Svetlana E., Ph.D. in Technology, P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, 152934, Rybinsk, st. Pushkina, bld. 53, Yaroslavl region, Russia, e-mail: semsvet@mail.ru

Vorobyev Pavel Sergeevich, student, P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, 152934, Rybinsk, st. Pushkina, bld. 53, Yaroslavl region, Russia, e-mail: vorobps@gmail.com

Yeliseichev Evgeny Aleksandrovich, Head of the Civil Products Sector of the Chief Designer Department of JSC "Rybinsk Instrument Making Plant", senior lecturer, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, P.A. Solovyov 152934, Rybinsk, st. Pushkina, bld. 53, Yaroslavl region, Russia, e-mail: EvgenijEliseichev@yandex.ru

CACHE MEMORY FUNCTIONING PRINCIPLES IN HIERARCHICAL COMPUTER SYSTEMS FOR WORKING WITH MULTIMEDIA APPLICATIONS

Part 2

The article provides a preliminary analysis of the organization of a computer memory to develop a method for selecting of optimal cache memory parameters in terms of obtaining the necessary performance, area and power consumption when working with multimedia data.

Keywords: cache, cache memory, cache hit, cache miss, cache line, fully associative cache, N-way set associative cache, direct mapped cache.

Data of author:

Kravtsov Aleksandr Sergeevich, Stock Company "Molecular Electronics Research Institute", 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, Russia, 124460, e-mail: akravtsov@niime.ru

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ РЕАКТОРА С ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОДЛОЖЕК

Рассмотрены условия формирования равномерного пограничного газового слоя концентрации реагента у подложки при подаче из инжекторов газораспределительной головки в реакторе газофазного нанесения пленок. Предложены выражения для расчетов, сделаны оценки профиля скорости потока, толщины пограничного газового слоя у подложки и числа инжекторов в зависимости от геометрических характеристик устройства при субатмосферном нанесении слоев оксида кремния в режиме.

Ключевые слова: инжекторы газа, пограничный слой, профиль концентрации.

Сведения об авторе:

Евдокимов Владимир Лукьянович, Акционерное общество

«Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»,
124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1,
e-mail: vevdokimov@niime.ru

Патюков Сергей Иванович, кандидат технических наук, Акционерное общество

«Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»,
124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1,
e-mail: spatyukov@niime.ru

КИНЕТИКА РАДИКАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Исследована кинетика радикального окисления кремниевой пластины в системе индивидуальной загрузки при проведении процесса окисления с генерацией пара у поверхности пластины (*in situ* steam-generation – ISSG), основанном на сгорании водорода. Для определения констант радикального окисления использовались полученные зависимости толщины оксида от времени при различной температуре и фиксированных остальных параметрах технологического процесса. Показано, что радикальное ISSG окисление при низком давлении характеризуется высокой скоростью роста и определяется концентрацией радикалов кислорода. Константы радикального окисления позволяют объяснить слабую чувствительность толщины оксида к кристаллической ориентации, степени легирования и напряжениям. Описание радикального окисления линейно параболическим и экспоненциальным законами роста имеет практическое значение, так как позволяет совместно с моделированием состава газовой среды прогнозировать ISSG окисление в широком диапазоне параметров процесса.

Ключевые слова: радикальное окисление, кинетика роста оксида кремния, модель Дила-Гроува, экспоненциальный закон роста, реактор идеального смешения.

Сведения об авторе:

Черняев Михаил Владимирович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 103460, г. Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: mchernyaev@niime.ru

Горохов Сергей Александрович, Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 103460, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: sgorohov@niime.ru

Патюков Сергей Иванович, кандидат технических наук,

АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»,
103460, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1,
e-mail: spatyukov@niime.ru

Резванов Аскар Анварович, кандидат физико-математических наук, Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 103460, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: arezvanov@niime.ru

METHOD OF ANALYTICAL EVALUATION OF GAS DISTRIBUTION FOR A REACTOR WITH INDIVIDUAL SUBSTRATE TREATMENT

The conditions for the formation of a uniform boundary gas layer of the reagent concentration at the substrate when fed from the injectors of the gas distribution head in the reactor of gas-phase film deposition are considered. Expressions for calculations are proposed, estimates of the flow velocity profile, the thickness of the boundary gas layer at the substrate and the number of injectors are made depending on the geometric characteristics of the device during subatmospheric deposition of silicon oxide layers in the mode of diffusion restriction of the reagent supply.

Keywords: gas injectors, boundary layer, concentration profile.

Data of author:

Evdokimov Vladimir Lukyanovich, «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: vevdokimov@niime.ru
Patyukov Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: spatyukov@niime.ru

KINETICS OF RADICAL OXIDATION OF SILICON

The kinetics of radical oxidation of a silicon wafer in an individual loading system during the *in situ* steam-generation process (ISSG) based on hydrogen combustion is investigated. To determine the constants of radical oxidation, the obtained dependences of the oxide thickness on time at different temperatures and fixed other parameters of the technological process were used. It is shown that radical ISSG oxidation at low pressure is characterized by a high growth rate and is determined by the concentration of oxygen radicals. The radical oxidation constants allow us to explain the weak sensitivity of the oxide thickness to the crystal orientation, the degree of doping and stresses. The description of radical oxidation by linear-parabolic and exponential growth laws is of practical importance, since it allows, together with the modeling of the composition of the gas medium, to predict ISSG oxidation in a wide range of process parameters.

Keywords: radical oxidation, kinetics of silicon oxide growth, Deal-Grove model, exponential growth law, well stirred reactor.

Data of author:

Chernyaev Mikhail Vladimirovich, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: mchernyaev@niime.ru

Gorokhov Sergey Aleksandrovich, Moscow Institute of Physics and Technology 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation; Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: sgorohov@niime.ru

Patyukov Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: spatyukov@niime.ru

Rezvanov Askar Anvarovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation; Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: arezvanov@niime.ru

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИЗАЙНА И ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ФОТОШАБЛОНОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ КОМПЕНСАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ OPC (OPTICAL PROXIMITY CORRECTION)

В работе представлен опыт разработки технологий проектирования дизайна и изготовления фотошаблона с элементами компенсации эффектов оптической близости OPC (Optical Proximity Correction) для производства ИС с проектными нормами 130 нм с применением техники повышения разрешения RET (Reticle Enhancement Technique). Корректность разработанных технологий подтверждена результатами контроля сложных фотошаблонов с элементами коррекции эффектов оптической близости OPC.

Ключевые слова: дизайн фотошаблона, коррекция эффектов оптической близости, фотолитография, изготовление фотошаблонов.

Сведения об авторе:

Беленков Александр Николаевич, АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (АО «ЗИТЦ»), 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6; e-mail: belenkov@zitic.ru

Овчинников Вячеслав Алексеевич, кандидат технических наук, АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (АО «ЗИТЦ») 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6; e-mail: ova@fotoshablons.ru

Морозов Сергей Игоревич, АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (АО «ЗИТЦ»), 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6; e-mail: morozov@fotoshablons.ru

Хрущев Никита Сергеевич, АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (АО «ЗИТЦ»), 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6; e-mail: khrushchev@fotoshablons.ru

EXPERIENCE OF DESIGN ENGINEERING AND MANUFACTURING OF COMPLEX PRECISION PHOTOMASK PATTERNS APPLYING OPTICAL PROXIMITY CORRECTION (OPC) ELEMENTS

The document presents the experience of developing technologies for design engineering and manufacturing of complex precision photomask patterns applying optical proximity correction (OPC) elements in order to produce ICs with 130 nm design standards using RET (Reticle Enhancement Technique). The correctness of developed technologies is confirmed by results of complex photomask control with elements of optical proximity correction of OPC effects.

Keywords: photomask design, correction of optical proximity effects, photolithography, manufacturing of photomasks.

Data of author:

Belenkov Aleksandr Nikolayevich, Zelenograd Innovation and Technology Center JSC (ZITC, JSC), 124527, Moscow, Zelenograd, ul. Solnechnaya Alleya, 6; e-mail: belenkov@zitic.ru

Ovchinnikov Vyacheslav Alekseevich, candidate of engineering Sciences, Zelenograd Innovation and Technology Center JSC (ZITC, JSC), 124527, Moscow, Zelenograd, ul. Solnechnaya Alleya, 6; e-mail: ova@fotoshablons.ru

Morozov Sergey Igorevich, Zelenograd Innovation and Technology Center JSC (ZITC, JSC), 124527, Moscow, Zelenograd, ul. Solnechnaya Alleya, 6; e-mail: morozov@fotoshablons.ru

Khrushchev Nikita Sergeevich, Zelenograd Innovation and Technology Center JSC (ZITC, JSC), 124527, Moscow, Zelenograd, ul. Solnechnaya Alleya, 6; e-mail: khrushchev@fotoshablons.ru

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОДНОТОЧЕЧНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Представлен оригинальный вывод формул Ландау–Лифшица–Лооенга и Биира для вычисления эффективных диэлектрических характеристик композиционных материалов. Проведен анализ областей применимости этих соотношений в зависимости от объемной концентрации и свойств компонентов материала.

Ключевые слова: эффективная диэлектрическая проницаемость, одноточечное корреляционное приближение, формула Ландау–Лифшица–Лооенга, формула Биира, матричный композит.

Сведения об авторе:

Яковлев Виктор Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16а; e-mail: yakvb@mail.ru

Бардушкин Андрей Владимирович, младший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16а; e-mail: i170k@yandex.ru

ON THE USE OF SINGLE-POINT CORRELATION APPROXIMATIONS FOR THE ANALYSIS OF THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF MICROELECTRONICS COMPOSITE MATERIALS

An original derivation of the Landau–Lifshitz–Loeeng and Beer formulas for calculating the effective dielectric characteristics of composite materials is presented. The areas of applicability of these ratios were analyzed depending on the volume concentration and properties of the material components.

Keywords: effective permittivity, one-point correlation approximation, Landau–Lifshitz–Loeeng formula, Beer formula, matrix composite.

Data of author:

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

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

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕСПЕРЕХОДНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА СО СЛАБОЛЕГИРОВАННОЙ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТЬЮ НА ОБЕДНЕНИЕ КАНАЛА ПРИБОРА

Представлен анализ развития МОП-транзисторов со встроенным каналом и показана перспективность приборов со слаболегированной рабочей областью. С использованием средств TCAD показано, что электрическое поле n^+n -перехода стока в зависимости от его расположения относительно края канала беспереходного МОП-транзистора со слаболегированной рабочей областью и глубины залегания существенно влияет на распределение потенциала и электронов в канале прибора.

Ключевые слова: беспереходный транзистор, моделирование, TCAD.

Сведения об авторе:

Королев Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ); 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: mikor33@rambler.ru

Красюков Антон Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ); 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: a_kras@org.miet.ru

Чалпыгин Юрий Александрович, академик РАН, президент НИУ МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ); 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1; e-mail: ieem@miee.ru

ОТДЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 180 И 90 НМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ

Статья посвящена отдельным вопросам оценки качества базовых технологий в условиях ограниченных ресурсов. Авторами проведен анализ условий применения базовых технологий в РФ на основе собранных статистических данных, обуславливающих необходимость специальных методов мониторинга и анализа. Предложен алгоритм оценки соответствия spice-моделей элементной базы текущему состоянию техпроцесса, а также рассмотрены системные вопросы внедрения новых материалов на производственной линии, реализующей семейства базовых технологий.

Ключевые слова: базовая технология, ресурсы, качество, Spice-модели, мониторинг, анализ.

Сведения об авторе:

Панасюк Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: vpanasyuk@niime.ru;

Королева Анна Николаевна, кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: akoroleva@niime.ru

Игнатов Павел Викторович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: paignatov@niime.ru

Шипицин Дмитрий Святославович, кандидат физико-математических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: dshipitsin@niime.ru

Потупчик Александр Георгиевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: apotupchik@niime.ru

ON THE USE OF SINGLE-POINT CORRELATION APPROXIMATIONS FOR THE ANALYSIS OF THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF MICROELECTRONICS COMPOSITE MATERIALS

An analysis of the development of MOS transistors with a built-in channel is presented and the prospects for devices with a lightly doped working area are shown. Using TCAD tools, it is shown that the electric field of the drain n^+n -junction, depending on its location relative to the edge of the channel of a junctionless MOS transistor with a lightly doped working area and the junction depth, significantly affects the distribution of potential and electrons in the channel of the device.

Keywords: junctionless transistor, simulation, TCAD.

Data of author:

Korolev Mikhail Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems; National Research University of Electronic Technology (MIET); Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: mikor33@rambler.ru

Krasukov Anton Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Integrated Electronics and Microsystems; National Research University of Electronic Technology (MIET); Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: a_kras@org.miet.ru

Chaplygin Yury Alexandrovich, Academician RAS, President of; National Research University of Electronic Technology (MIET); Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: ieem@miee.ru

ON THE USE OF SINGLE-POINT CORRELATION APPROXIMATIONS FOR THE ANALYSIS OF THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF MICROELECTRONICS COMPOSITE MATERIALS

The article is devoted to topical issues of quality assessment of basic technologies in conditions of limited resources. The authors analyzed the conditions for the use of basic technologies in the Russian Federation, and presented statistical data that necessitate special methods of monitoring and analysis. An algorithm for assessing the compliance of spice-models of the element base with the current state of the technical process is proposed, and systemic issues of introducing new materials implementation into a production line that implements families of basic technologies are considered.

Keywords: basic technology, quality, Spice-models, monitoring, analysis.

Data of author:

Panasyuk Vitaly Nikolaevich, Grand PhD in Engineering, Professor, SC MERI; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1, Akademika Valieva street, e-mail: vpanasyuk@niime.ru

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

Ignatov Pavel Victorovich, SC MERI; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1, Akademika Valieva street, e-mail: paignatov@niime.ru

Shipitsin Dmitry Svyatoslavovich, PhD in Physics and Mathematics, SC MERI; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1, Akademika Valieva street, e-mail: dshipitsin@niime.ru

Potupchik Alexander Georgievich, SC MERI; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 6/1, Akademika Valieva street, e-mail: apotupchik@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 25.11.2022.

Отпечатано в ФГБУ Издательство «Наука»
(Типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., 6
Заказ № 36
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

ФГБУ Издательство «Наука»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
E-mail: info@naukaran.com
<https://naukapublishers.ru>
<https://naukabooks.ru>