

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 1(189) 2023

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Выпуск 1(189) 2023

Москва, 2023

«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.**Серия 3.****МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»****Редакционный совет****Главный редактор****Красников Геннадий Яковлевич,**
д. т. н., академик РАН**Члены редакционного совета****Асеев Александр Леонидович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Vaklanov M. R., Dr. Sc.**Бетелин Владимир Борисович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Бокарев Валерий Павлович,

ответственный секретарь, д. т. н.

Бугаев Александр Степанович,

д. ф.-м. н., академик РАН

Быков Виктор Александрович,

д. т. н.

Галиев Галиб Бариевич, д. ф.-м. н.**Горбачевич Александр Алексеевич,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Горнев Евгений Сергеевич,

зам. главного редактора,

д. т. н., член-корреспондент РАН

Ким Александр 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**Разработка и конструирование****А.К. Максимов, А.В. Попов, С.Ф. Семенов**Разработка систем тестирования и отладки программируемых
логических интегральных схем 5**Е.Ю. Котляров, М.Г. Путря, В.Ю. Михайлов, С.С. Гусев,
Е.Д. Маркасов, А.С. Россов**Разработка микросхемы 6-разрядного фазовращателя
X-диапазона частот на основе 90 нм КМОП технологии 9**Процессы и технология****М.В. Черняев, С.А. Горохов, С.И. Патюков, А.А. Резванов**Формирование подзатворных диэлектриков различной толщины
с использованием радикального окисления 23**M.V. Chernyaev, S.A. Gorokhov, S.I. Patyukov, A.A. Rezvanov**

Gate oxides of various thicknesses formation using ISSG oxidation 27

В.С. Калашников, А.Л. Керре, В.П. Розенфельд,**М.Ю. Семенов, Ю.Г. Смирнов, М.А. Сотников, С.Ф. Царапкин**Ускорение перехода на отечественный технологический процесс
с использованием автоматизированной миграции СФ-блоков 31**Свойства материалов****А.В. Бардушкин, В.Б. Яковлев**Влияние компонентов матричного композита на распределение
электрических полей на поверхности включений 37**Математическое моделирование****А.С. Койгеров**Поперечно-связанный резонаторный фильтр на поверхностных
акустических волнах. Применение COMSOL для анализа
параметров акустических мод 43**А.Э. Шамхалов, Т.Ю. Крупкина**Автоматизация процесса верификации SPICE-моделей
транзисторов на базе среды проектирования Cadence Virtuoso 50**А.Е. Shamhalov, T.Yu. Krupkina**Automation to transistors SPICE-models verification process is on based
Cadence Virtuoso design environment 58**Аннотации** 66

**“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

Development and Designing

A.K. Maksimov, A.V. Popov, S.F. Semyonov

Development of systems for testing and debugging

field-programmable gate array 5

E.Yu. Kotlyarov, M. G. Putrya, V.Yu. Mikhailov, S.S. Gusev,

E.D. Markasov, A.S. Rossov

Design of 90 nm CMOS X-Band 6-Bit Digital Phase Shifter 9

Processes and Technology

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

Gate oxides of various thicknesses formation using ISSG oxidation 23; 27

V.S. Kalashnikov, A.L. Kerre, V.P. Rozenfeld, M.Y. Semenov,

Iu.G. Smirnov, M.A. Sotnikov, S.F. Tsarapkin

Accelerating the transition to domestic process technologies using

automated migration of IP-blocks 9

Properties of Materials

A.V. Bardushkin, V.B. Yakovlev

Effect of matrix composite components on the distribution

of electric fields on the surfaces of inclusions 37

Mathematical Simulation

A.S. Koigerov

Transverse coupled resonator filter on surface acoustic waves.

Application of COMSOL for analysis acoustic mode parameters 43

A.E. Shamhalov, T.Yu. Krupkina

Automation to transistors SPICE-models verification process is on based

Cadence Virtuoso design environment 50; 58

Abstracts 66

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

Выпуск журнала представлен семью оригинальными статьями по актуальным научным исследованиям, относящимся к рубрикам «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Свойства материалов», «Математическое моделирование».

Номер открывается разделом «Разработка и конструирование», в первой статье которого рассмотрены проблемы разработки систем отладки и тестирования, построенных на основе программируемых логических интегральных схем, реализовано несколько способов записи конфигурационной памяти, рассмотрены особенности разработки печатных плат для подобных систем. Авторами следующей статьи предложен процесс выбора и адаптации схемотехнических решений для реализации схемы б-разрядного фазовращателя X-диапазона частот с минимальным вносимым ослаблением и фазовой ошибкой, в свете налагаемых 90 нм КМОП технологией ограничений.

В первой статье раздела «Процессы и технология» исследовано формирование двойных затворов с использованием пирогенного окисления и окисления с генерацией пара у поверхности пластины (ISSG). Показано, что ISSG окисление при создании 2-го оксида оказывает незначительное влияние на толщину 1-го толстого оксида по сравнению с пирогенным окислением, что объясняется кинетикой радикального окисления кремния. Во второй статье рассмотрены задачи, которые решаются в процессе разработки автоматизированной миграции схемотехнического представления и топологии сложных функциональных блоков СБИС при переходе на отечественные технологические процессы, показаны преимущества использования автоматизированной миграции СФ-блоков.

В следующем разделе «Свойство материалов» авторами проведены численные свойства, пока-



завшие, что распределение электрических полей на поверхности изометричных включений является неоднородным даже при однородном внешнем воздействии и существенно зависит от соотношения относительных диэлектрических проницаемостей матрицы и включений.

В последнем разделе «Математическое моделирование» рассмотрено использование численного моделирования на основе метода конечных элементов COMSOL для анализа параметров акустических мод и экспериментально подтверждена адекватность рассмотренного подхода к моделированию. Во второй статье представлен результат разработки автоматизации процесса верификации SPICE-моделей транзисторов на базе среды проектирования CADENCE VIRTUOSO. Приведено описание принципов работы программы, перечень используемых верификационных тестов и результаты практического использования ПО для технологии КНИ 90 нм.

Приглашаем всех заинтересованных читателей к сотрудничеству!

С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН,

Г.Я. Красников

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ТЕСТИРОВАНИЯ И ОТЛАДКИ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В статье рассматриваются проблемы разработки систем отладки и тестирования, построенных на основе программируемых логических интегральных схем. Реализовано несколько способов записи конфигурационной памяти. Рассмотрены особенности разработки печатных плат для подобных систем.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, печатная плата, разработка средств отладки.

Сведения об авторах:

Максимов Александр Константинович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: amaksimov@niime.ru

Семенов Святослав Федорович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: svsemenov@niime.ru

Попов Антон Вадимович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: anpopov@niime.ru

РАЗРАБОТКА МИКРОСХЕМЫ 6-РАЗРЯДНОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ 90 НМ КМОП ТЕХНОЛОГИИ

Статья посвящена аспектам разработки цифровых фазовращателей X-диапазона частот для использования в приеме-передающем тракте систем с фазированными антенными решетками, на основе библиотеки кремниевой технологии 90 нм. В рамках данной работы продемонстрирован процесс выбора и адаптации схемотехнических решений для реализации схемы 6-разрядного фазовращателя с минимальным вносимым ослаблением и фазовой ошибкой, в свете налагаемых технологических ограничений.

Ключевые слова: КМОП, СВЧ, интегральная микросхема, фазовращатель, X-диапазон.

Сведения об авторах:

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

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

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

Гусев Сергей Сергеевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: sgusev@niime.ru

Маркасов Евгений Дмитриевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: emarkasov@niime.ru

Россов Александр Сергеевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: arossov@niime.ru

DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR TESTING AND DEBUGGING FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAY

The article deals with the main problems associated with the development of debugging and testing systems for field-programmable gate array. Implemented several ways to write configuration memory. And also the features of the development of printed circuit boards for such systems are considered.

Keywords: field-programmable gate array, printed circuit board, development of debugging tools.

Data of authors:

Maksimov Aleksandr Konstantinovich, «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: amaksimov@niime.ru

Semenov Svyatoslav Fedorovich, «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: svsemenov@niime.ru

Popov Anton Vadimovich, «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: anpopov@niime.ru

DESIGN OF 90 NM CMOS X-BAND 6-BIT DIGITAL PHASE SHIFTER

The article is devoted to the X-band digital phase shifter development aspects of the TRM SoC based on a 90 nm silicon technology library for phased antenna array system applications. Within the framework of this work, the process of selecting and adapting circuit solutions for the 6-bit phase shifter circuit implementation with minimal insertion loss and low phase error is demonstrated despite limitations imposed by the silicon technology.

Keywords: CMOS, MMIC, phase shifter, X-band, GHz.

Data of authors:

Kotlyarov Evgeny Yurievich, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460; «National research university «Moscow institute of electronic technology»», 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 1, e-mail: ekotlyarov@niime.ru

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

Mikhailov Victor Yurievich, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: vmikhaylov@niime.ru

Gusev Sergey Sergeevich, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: sgusev@niime.ru

Markasov Evgeny Dmitrievich, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: emarkasov@niime.ru

Rossov Alexander Sergeevich, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 124460, e-mail: arossov@niime.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПОДЗАТВОРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИКАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ

Для повышения функциональных возможностей современных интегральных схем (ИС) часто требуется создавать подзатворные диэлектрики различной толщины (Dual Gate Oxide) на одном кристалле. В настоящее время для этой цели используется двойное окисление: толстый диэлектрик создают в результате двух процессов окисления, а тонкий – только одного. В данной работе исследуется формирование двойных затворов с использованием пирогенного окисления и окисления с генерацией пара у поверхности пластины (*in situ* steam-generation – ISSG). Показано, что ISSG окисление при создании 2-го оксида оказывает незначительное влияние на толщину 1-го толстого оксида по сравнению с пирогенным окислением, что объясняется особенностью кинетики радикального окисления кремния.

Ключевые слова: двойной затвор, подзатворный диэлектрик, радикальное окисление, кинетика роста оксида кремния.

Сведения об авторах:

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

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

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

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

УСКОРЕНИЕ ПЕРЕХОДА НА ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МИГРАЦИИ СФ-БЛОКОВ

В статье рассмотрены задачи, которые решаются в процессе разработки автоматизированной миграции схемотехнического представления и топологии сложных функциональных блоков СБИС при переходе на отечественные технологические процессы. Показаны преимущества использования автоматизированной миграции на примере тестовых блоков.

Ключевые слова: технологическая миграция, миграция топологии, миграция схемы, аналоговый СФ-блок, повторное использование проекта.

Сведения об авторах:

Калашников Вячеслав Сергеевич, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6, e-mail: info@nm-tech.org

Керре Александр Леонидович, Общество с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6, e-mail: info@nm-tech.org

Розенфельд Владимир Павлович, Общество с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6, e-mail: info@nm-tech.org

Семёнов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6, e-mail: info@nm-tech.org

Смирнов Юрий Геннадьевич, Общество с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6, e-mail: info@nm-tech.org

Сотников Михаил Анатольевич, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6, e-mail: info@nm-tech.org

Царапкин Сергей Фёдорович, Общество с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6, e-mail: info@nm-tech.org

GATE OXIDES OF VARIOUS THICKNESSES FORMATION USING ISSG OXIDATION

To improve the functionality of state-of-the-art integrated circuits, it is often necessary to create gate oxides of various thicknesses on a single chip. Currently, double oxidation is used for this purpose: a thick dielectric is created as a result of two oxidation processes, and a thin dielectric – only one. In this paper, the formation of dual gate oxide using pyrogenic oxidation and ISSG (*in situ* steam-generation) is investigated. It is shown that ISSG oxidation during the creation of the 2nd oxide has a negligible effect on the thickness of the 1st thick oxide compared with pyrogenic oxidation, which is explained by the kinetics of radical oxidation of silicon.

Keywords: dual gate oxide, gate dielectric, radical oxidation, kinetics of silicon oxide growth.

Data of authors:

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

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

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

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

ACCELERATING THE TRANSITION TO DOMESTIC PROCESS TECHNOLOGIES USING AUTOMATED MIGRATION OF IP BLOCKS

The article considers schematic and layout migration tasks which appear during automated migration of IP blocks to domestic technology processes. Demonstrated advantages of using automated migration with the example of test IP blocks.

Keywords: technology migration, layout migration, schematic migration, analog IP block, design reuse.

Data of authors:

Kalashnikov Viacheslav Sergeevich, Ph.D., LLC «NM-Tech», Solnechnaya Alley 6, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: info@nm-tech.org

Kerre Alexander Leonidovich, LLC «NM-Tech», Solnechnaya Alley 6, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: info@nm-tech.org

Rozenfeld Vladimir Pavlovich, LLC «NM-Tech», Solnechnaya Alley 6, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: info@nm-tech.org

Semenov Mikhail Yurievich, Ph.D., LLC «NM-Tech», Solnechnaya Alley 6, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: info@nm-tech.org

Smirnov Iurii Gennadievich, LLC «NM-Tech», Solnechnaya Alley 6, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: info@nm-tech.org

Sotnikov Mikhail Anatolievich, Ph.D., LLC «NM-Tech», Solnechnaya Alley 6, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: info@nm-tech.org

Tsarapkin Sergei Fedorovich, LLC «NM-Tech», Solnechnaya Alley 6, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: info@nm-tech.org

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЙ

В приближении метода эффективной среды получены выражения для операторов концентрации напряженности и индукции электрического поля на поверхности включений в матричном композите. Данные операторы связывают поля на поверхности включения со стороны матрицы со средними напряженностью и индукцией электрического поля в образце композита. Проведенные численные расчеты показывают, что распределение электрических полей на поверхности изометричных включений является неоднородным даже при однородном внешнем воздействии и существенно зависит от соотношения относительных диэлектрических проницаемостей матрицы и включений.

Ключевые слова: матричный композит, включение, межфазные границы, поверхностные операторы концентрации напряженности и индукции электрического поля.

Сведения об авторах:

Яковлев Виктор Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, ученый секретарь ИНМЭ РАН, 115487, Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11, e-mail: yakvb@mail.ru

Бардушкин Андрей Владимирович, младший научный сотрудник, Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, 115487, Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11, e-mail: il70k@yandex.ru

ПОПЕРЕЧНО-СВЯЗАННЫЙ РЕЗОНАТОРНЫЙ ФИЛЬТР НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ. ПРИМЕНЕНИЕ COMSOL ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ МОД

Поперечно-связанные резонаторные фильтры (ПСРФ) применяются для реализации узкополосных и сверхузкополосных фильтров с относительными полосами пропускания 0,01...0,15%. К достоинствам таких фильтров относятся небольшое вносимое затухание, высокое внеполосное подавление, малое значение неравномерности амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания. Модель связанных мод (МСМ) является широко используемым методом моделирования для ПСРФ, но требует точного определения значений параметров акустических волн. Параметры МСМ можно определить экспериментально, аналитически или на основе численного расчета. В работе предлагается использование численного моделирования на основе метода конечных элементов для анализа параметров акустических мод. Результаты эксперимента подтвердили адекватность рассмотренного подхода к моделированию.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, фильтр на ПАВ, узкополосный, кварц, МКЭ, COMSOL.

Сведения об авторе:

Койгеров Алексей Сергеевич; кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники (МНЭ), докторант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197002, Россия, e-mail: a.koigerov@gmail.ru

EFFECT OF MATRIX COMPOSITE COMPONENTS ON THE DISTRIBUTION OF ELECTRIC FIELDS ON THE SURFACES OF INCLUSIONS

In the approximation of the effective medium method, expressions for the operators of strength concentration and electric field induction on the surface of inclusions in a matrix composite are obtained. These operators relate the fields on the inclusion surface from the side of the matrix to the average strength and induction of the electric field in the composite sample. The performed numerical calculations show that the distribution of electric fields on the surface of isometric inclusions is inhomogeneous even under a uniform external impact and it significantly depends on the ratio of the relative permittivities of the matrix and inclusions.

Keywords: matrix composite, inclusion, interfaces, surface operators of strength concentration and electric field induction.

Data of authors:

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, 16a, e-mail: yakvb@mail.ru

Barдушкин Андрей Владимирович, junior research assistant of Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Nagatinskaya street, 16a, e-mail: il70k@yandex.ru

TRANSVERSE COUPLED RESONATOR FILTER ON SURFACE ACOUSTIC WAVES. APPLICATION OF COMSOL FOR ANALYSIS ACOUSTIC MODE PARAMETERS

Transverse coupled resonator filters (TCRF) are used to implement narrow-band and ultra-narrow-band filters with relative bandwidths of 0,01...0,15%. The advantages of such surface acoustic wave filters are: low insertion attenuation, high out-of-band suppression, low value of the frequency response unevenness in the passband. The coupling of modes (COM) model is a widely used modeling method for TCRF, but requires precise values of acoustic wave parameters. COM parameters can be determined experimentally, analytically or based on numerical calculation. In this paper, the use of numerical approach based on the finite element method in COMSOL for analyzing the parameters of transverse acoustic modes is considered. The results of the experiment confirmed the adequacy of the considered approach to modeling.

Keywords: surface acoustic wave, SAW filter, narrowband, quartz, FEM, COMSOL.

Data of author:

Aleksey Sergeevich Koigerov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Micro- and Nano Electronics (MNE), St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI» V.I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St. Petersburg 197002, Russia, e-mail: a.koigerov@gmail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЕРИФИКАЦИИ SPICE-МОДЕЛЕЙ ТРАНЗИСТОРОВ НА БАЗЕ СРЕДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ CADENCE VIRTUOSO

В работе представлен результат разработки программного средства верификации SPICE-моделей МОП-транзисторов. Представлено описание принципов работы программы, перечень используемых верификационных тестов и результаты практического использования ПО для технологии КНИ 90 нм. Данная программа полностью реализована в среде Cadence Virtuoso посредством использования языка программирования SKILL.

Ключевые слова: проектирование ИС, SPICE-модель, верификация, МОП-транзистор.

Сведения об авторах:

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

Крупкина Татьяна Юрьевна, доктор технических наук, профессор НИУ «МИЭТ», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, 1, e-mail: krupkina@miee.ru

AUTOMATION TO TRANSISTORS SPICE-MODELS VERIFICATION PROCESS IS ON BASED CADENCE VIRTUOSO DESIGN ENVIRONMENT

The paper presents the result of developing a software tool for verifying SPICE-models of MOSFETs. A description of the principles of the program operation, a list of used verification tests and the results of the practical use of software for SOI90 nm technology are advanced. This program is fully implemented in the Cadence Virtuoso, using the SKILL programming language.

Keywords: IC design, SPICE-model, verification, MOSFET.

Data of authors:

Shamhalov Arsen Eduardovich, Federal State Autonomic Educational Institution of Higher Education «National research university «Moscow institute of electronic technology», SC, 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 1, «Molecular Electronics Research Institute», SC, 6/1, Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: ashamhalov@niime.ru
Krupkina Tatyana Yuryevna, Doctor of Engineering Sciences, Professor, «National research university «Moscow institute of electronic technology», 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 1, e-mail: krupkina@miee.ru