

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 2(194) 2024

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 2(194) 2024

Москва, 2024

«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.**Горбацевич Александр Алексеевич,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Горнев Евгений Сергеевич,

зам. главного редактора,

д. т. н., член-корреспондент РАН

Ким Александр Киирович, 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****Е.Ю. Котляров, В.В. Лосев, Ю.А. Чаплыгин, А.И. Хлыбов,****Д.В. Родионов, В.Ю. Михайлов**

Разработка микросхемы 6-разрядного фазовращателя системы

АФАР Ka-диапазона на основе технологии GaAs HEMT 250 нм 5

E.Yu. Kotlyarov, V.V. Losev, Yu.A. Chaplygin, A.I. Khlybov,**D.V. Rodionov, V.Yu. Mikhailov**

250 nm GaAs HEMT Ka-band 6-bit phase shifter design 19

А.Д. Калёнов, В.В. Лосев, М.С. Кульпинов

Метод проектирования интегрального переключателя 1 в 4 32

A.D. Kalyonov, V.V. Losev, M.S. Kulpinov

Design method of a 1-in-4 integrated switch 37

Процессы и технология**В.Ю. Абросимов, В.Ю. Киреев, О.В. Панкратов, К.Э. Певчих,****Р.Ю. Розанов**

Возможности и ограничения формирования топологических

размеров в функциональных слоях микроэлектронных и фотонных

ИМС в циклических импульсных процессах вакуумно-плазменного

травления 42

**Технологическое и измерительное
оборудование****В.Б. Смирнов, Д.А. Сафонова, С.И. Якименко**

Системы получения ультрачистой воды 80

Свойства материалов**М.Ю. Жук, Е.С. Горнев, А.В. Зенкевич**

Резистивная энергонезависимая память (ReRAM) на основе

функциональных слоев TaO_x: статус отечественных разработок 87**М.И. Титов, А.А. Буш, К.Е. Каменцев, Т.А. Агеева,****Е.В. Савинкина, И.А. Караваев, В.В. Фомичев**

Диэлектрические свойства полимерных плёнок диацетата

целлюлозы с внедрёнными в них полярными молекулами

комплексов нитратов РЗЭ с карбамидом и ацетамидом 111

Надёжность**Е.С. Горнев**

Обеспечение надёжности современных интегральных микросхем.

Часть 2. Насущные проблемы 121

Аннотации 136Журнал включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК)
в число изданий, рекомендованных для публикации статей
соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук № 2906

**“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.

Gorbatsevich 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

**E.Yu. Kotlyarov, V.V. Iosev, Yu.A. Chaplygin, A.I. Khlybov,
D.V. Rodionov, V.Yu. Mikhailov**
250 nm GaAs HEMT Ka-band 6-bit phase shifter design 5, 19

A.D. Kalyonov, V.V. Losev, M.S. Kulpinov
Design method of a 1-in-4 integrated switch 32, 37

Processes and technology

**V.Yu. Abrosimov, V.Yu. Kireev, O.V. Pankratov, K.E. Pevchikh,
R.Yu. Rozanov**
Possibilities and limitations of the formation of topological dimensions
in the functional layers of microelectronic and photonic IC in cyclic
pulse processes of vacuum plasma etching 42

Processing and measuring equipment

V.B. Smirnov, D.A. Safonova, S.I. Yakimenko
Ultrapure water treatment systems 80

Properties of materials

M.Yu. Zhuk, E.S. Gornev, A.V. Zinkevich
Resistive non-volatile memory (RERAM) based on TaOX functional
layers: status of domestic developments 87

**M.I. Titov, A.A. Bush, K.E. Kamentsev, T.A. Ageeva,
E.V. Savinkina, I.A. Karavaev, V.V. Fomichev**
Dielectric properties of cellulose diacetate polymer films
with polar molecules embedded in them complexes of REE nitrates
with carbamide and acetamide 111

Reliability

E.S. Gornev
Modern integrated circuits reliability assurance. Part 2. Current issues 121

Abstracts 136

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 № 2906 by the Higher attestation
Commission (НАС)

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед вами очередной 194-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

В данном номере внимание читателей журнала привлекут тематические материалы, опубликованные под рубриками: «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Технологическое и измерительное оборудование», «Свойства материалов», «Надёжность».

Выпуск журнала представлен семью оригинальными статьями, посвящёнными результатам актуальных научных исследований.

Номер открывается разделом «Разработка и конструирование», в котором одна из публикаций посвящена аспектам разработки цифровых фазовращателей Ka-диапазона частот для использования в приеме-передающем тракте систем с фазированными антенными решётками, на основе библиотеки GaAs рНЕМТ 250 нм. Во второй статье данного раздела приведено описание метода проектирования и расчёта дифференциального переключателя 1 в 4 с компенсацией паразитного сигнала.

В следующем блоке «Процессы и технология» рассмотрена проблема обеспечения гладкости боковых стенок структур при формировании топологических размеров в органических резистивных маскирующих покрытиях и их переносе на функциональные слои кристаллов микроэлектронных и фотонных интегральных микросхем в непрерывных и циклических процессах вакуумно-плазменного травления (ВПТ).

В следующем блоке «Технологическое и измерительное оборудование» приведён краткий исторический обзор развития систем получения ультрачистой воды для производства микроэлектроники.

В первой статье раздела «Свойства материалов» описаны ранее не публиковавшиеся результаты исследований в области создания резистивной памяти (ReRAM) на основе структур Ta/TaOx/Pt, проведённых в МФТИ в тесной кооперации с НИИМЭ и ПАО «Микрон».



Во второй публикации методом выпаривания растворов сформированы полимерные плёнки ди-ацетата целлюлозы (ДАЦ) с внедрёнными в них полярными молекулами $[\text{Pr}(\text{Ur})_4(\text{NO}_3)_3]$, $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Ur})_2(\text{NO}_3)_3]$, $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})(\text{Ur})_4(\text{NO}_3)_2]\text{NO}_3$, $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})(\text{AA})_3(\text{NO}_3)_3]$ (Ur – карбамид, AA – ацетамид).

В заключительном блоке «Надёжность» освещаются насущные проблемы обеспечения надёжности современных интегральных микросхем.

Приглашаем всех заинтересованных читателей к сотрудничеству!

С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН

Г.Я. Красников

РАЗРАБОТКА МИКРОСХЕМЫ 6-РАЗРЯДНОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ СИСТЕМЫ АФАР Ка-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ GaAs HEMT 250 нм

Статья посвящена аспектам разработки цифровых фазовращателей Ка-диапазона частот для использования в приеме-передающем тракте систем с фазированными антенными решетками, на основе библиотеки GaAs pHEMT 250 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 при использовании микрополосковых линий задержки в качестве фазосдвигающих элементов.

Ключевые слова: GaAs, СВЧ, интегральная микросхема, фазовращатель, Ка-диапазон.

Сведения об авторах:

Котляров Евгений Юрьевич, аспирант института ИнЭЛ, НИУ МИЭТ, пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, ведущий инженер-конструктор отдела разработки интегральных схем, АО «НИИМЭ» 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: ekotlyarov@niime.ru;

Лосев Владимир Вячеславович, доктор технических наук, профессор, директор института ИнЭЛ НИУ МИЭТ, пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: dsd@miee.ru;

Чаплыгин Юрий Александрович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, президент НИУ МИЭТ, пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: dsd@miee.ru;

Хлыбов Александр Иванович, кандидат технических наук, ведущий инженер НИУ МИЭТ, пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: alex1818@yandex.ru;

Родионов Денис Владимирович, ведущий инженер НИУ МИЭТ, пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: denis.rodionov@gmail.com;

Михайлов Виктор Юрьевич, инженер-конструктор отдела разработки интегральных схем, АО «НИИМЭ» 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: vmikhaylov@niime.ru

250 nm GaAs HEMT Ka-BAND 6-BIT PHASE SHIFTER DESIGN

The paper is dedicated to the aspects of designing Ka-band digital phase shifters for transceiver phased array antenna systems based on GaAs pHEMT 250 nm library. The process of selecting and adapting schematic solutions for realizing a 6-bit phase shifter circuit with minimum insertion loss and RMS phase error using microstrip delay lines as phase shifting elements is demonstrated in this paper.

Keywords: switch, decoupling, loss, CMOS, microwave.

Data of authors:

Kotlyarov Evgeny Yurievich, Postgraduate student of the NRU MIET, pl. Shokina, 1, Zelenograd, Moscow, 124498, Senior Engineer of the IC Design Department, JSC MERI 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Ul. Academician Valieva, 6/1, e-mail: ekotlyarov@niime.ru;

Losev Vladimir Vyacheslavovich, Doctor of Engineering Sciences, professor, director of the institute InEL of the NRU MIET, pl. Shokina, 1, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: dsd@miee.ru;

Chaplygin Yuriy Aleksandrovich, Doctor of Engineering Sciences, professor, Academician of RAS, pl. Shokina, 1, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: dsd@miee.ru;

Khlybov Aleksander Ivanovich, PhD in Engineering Sciences, lead engineer of the NRU MIET, pl. Shokina, 1, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: alex1818@yandex.ru

Rodionov Denis Vladimirovich, Lead engineer of the NRU MIET, pl. Shokina, 1, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: denis.rodionov@gmail.com;

Mikhailov Victor Yurievich, Engineer of the IC Design Department, JSC MERI 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Ul. Academician Valieva, 6/1, e-mail: vmikhaylov@niime.ru

МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ 1 В 4

В работе приведено описание метода проектирования и расчёта дифференциального переключателя 1 в 4 с компенсацией паразитного сигнала. Разработка дифференциальных переключателей с расширенной полосой работы является важной и трудоёмкой задачей. В статье представлены результаты проектирования и моделирования дифференциального переключателя 1 в 4 с расширенной полосой работы с использованием технологии КМОП 180 нм.

Ключевые слова: переключатель, развязка, потери, КМОП, СВЧ.

Сведения об авторах:

Калёнов Александр Дмитриевич, ассистент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1, e-mail: kalyonov.alex@yandex.ru;

Лосев Владимир Вячеславович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1, e-mail: dsd@miee.ru;

Кульпинов Михаил Сергеевич, инженер, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1, e-mail: kulpms@gmail.com

DESIGN METHOD OF A 1-IN-4 INTEGRATED SWITCH

The paper describes a method for designing and calculating a 1-in-4 differential switch with parasitic signal compensation. The development of differential switches with extended band robots is an important and time-consuming task. The article presents the results of designing and modeling a 1-in-4 differential switch with an extended operating band using 180 nm CMOS technology.

Keywords: GaAs, MMIC, phase shifter, Ka-band, GHz.

Data of authors:

Kalyonov Alexander Dmitrievich, assistant, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: kalyonov.alex@yandex.ru;

Losev Vladimir Vyacheslavovich, Doctor of technical science, Associate Professor, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: dsd@miee.ru;

Kulpinov Mikhail Sergeevich, engineer, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: kulpms@gmail.com

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ В ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЯХ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ И ФОТОННЫХ ИМС В ЦИКЛИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССАХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Рассмотрена проблема обеспечения гладкости боковых стенок структур при формировании топологических размеров в органических резистивных маскирующих покрытиях и их переносе на функциональные слои кристаллов микроэлектронных и фотонных интегральных микросхем в непрерывных и циклических процессах вакуумно-плазменного травления (ВПТ). Проведена классификация процессов ВПТ по механизму воздействия на обрабатываемые структуры, проанализированы виды и механизмы процессов ВПТ кремния с непрерывной и циклической подачей реагентов, включая различные варианты Бош-процесса, процессов STiGer и OxiEtch, а также атомно-слоевого травления (АСТ).

Как показал анализ и проведенные нами эксперименты, непрерывные процессы ВПТ не могут обеспечить формирование структур световодов с атомарной гладкостью горизонтальных и боковых поверхностей. Кроме того, непрерывные процессы ВПТ используют относительно высокие 100...300 эВ энергии ионов, поэтому они не могут обеспечить толщину нарушенных слоёв под вытравленной поверхностью на атомарном уровне. Только комбинация циклических процессов ВПТ с реализацией АСТ на последней стадии способна обеспечить формирование световодов с атомарной гладкостью горизонтальных и боковых поверхностей и нарушенным слоем с толщиной на атомарном уровне.

Ключевые слова: технологические возможности и ограничения, непрерывные и циклические процессы вакуумно-плазменного травления, формирование световодов фотонных ИМС, механизмы и технологические характеристики циклических процессов анизотропного травления кремния, различные варианты Бош-процесса, процессы STiGer и OxiEtch, процессы атомно-слоевого травления.

Сведения об авторах:

Абросимов Виктор Юрьевич, АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», 124527, г. Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: abrosimov@zntc.ru;

Киреев Валерий Юрьевич, доктор технических наук, АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», 124527, г. Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: valerikireev@mail.ru;

Панкратов Олег Вячеславович, кандидат технических наук, АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», 124527, г. Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: pankratov@zntc.ru;

Певчих Константин Эдуардович, АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», e-mail: k.pevchikh@yandex.ru;

Розанов Роман Юрьевич, кандидат технических наук, АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: rozanov@zntc.ru

POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF THE FORMATION OF TOPOLOGICAL DIMENSIONS IN THE FUNCTIONAL LAYERS OF MICROELECTRONIC AND PHOTONIC IC IN CYCLIC PULSE PROCESSES OF VACUUM PLASMA ETCHING

The problem of ensuring the smoothness of the side walls of structures during the formation of topological dimensions in organic resistive masking coatings and their transfer to the functional layers of crystals of microelectronic and photonic integrated circuits in continuous and cyclic vacuum plasma etching (VPE) processes is considered. The classification of VPE processes according to the mechanism of action on the processed structures is carried out, the types and mechanisms of silicon VPE processes with continuous and cyclic supply of reagents are analyzed, including various variants of the Bosch process, STiGer and OxiEtch processes, as well as atomic layer etching (ALE).

As the analysis and experiments conducted by us have shown, continuous VPE processes cannot ensure the formation of fiber structures with atomic smoothness of horizontal and lateral surfaces. In addition, continuous VPE processes use relatively high (100–300) eV ion energies, so they cannot provide the thickness of the disturbed layers under the etched surface at the atomic level... Only a combination of cyclic VPE processes with the implementation of ALE at the last stage is able to ensure the formation of optical fibers with atomic smoothness of horizontal and lateral surfaces and a disturbed layer with thickness at the atomic level.

Keywords: technological capabilities and limitations, continuous and cyclic processes of vacuum plasma etching, formation of photonic IC light guides, mechanisms and technological characteristics of cyclic processes of anisotropic etching of silicon, various variants of the Bosch process, STiGer and OxiEtch processes, atomic layer etching processes.

Data of authors:

Abrosimov Victor Yuryevich, Joint Stock Company "Zelenograd Nanotechnology Center", 124527, 6, Solnechnaya Alleya, Zelenograd, Moscow, e-mail: abrosimov@zntc.ru;

Kireev Valeriy Yuryevich, Dr. Sci., Joint Stock Company "Zelenograd Nanotechnology Center", 124527, 6, Solnechnaya Alleya, Zelenograd, Moscow, e-mail: valerikireev@mail.ru;

Pankratov Oleg Vyacheslavovich, PhD (technical sciences), Joint Stock Company "Zelenograd Nanotechnology Center", 124527, 6, Solnechnaya Alleya, Zelenograd, Moscow, e-mail: pankratov@zntc.ru;

Pevchikh Konstantin Eduardovich, Joint Stock Company "Zelenograd Nanotechnology Center", 124527, 6, Solnechnaya Alleya, Zelenograd, Moscow, e-mail: k.pevchikh@yandex.ru;

Rozanov Roman Yuryevich, PhD (technical sciences), Joint Stock Company "Zelenograd Nanotechnology Center", 124527, 6, Solnechnaya Alleya, Zelenograd, Moscow, e-mail: rozanov@zntc.ru

СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАЧИСТОЙ ВОДЫ

В статье дан краткий исторический обзор развития систем получения ультрачистой воды для производства микроэлектроники. Ключевая технология в подготовке воды отведена технологии обратного осмоса, рассмотрены технологии по удалению бора, контролю частиц, и финишной деионизации.

Ключевые слова: ультрачистая вода, технология обратного осмоса, удаление бора.

Сведения об авторах:

Смирнов Владимир Брониславович, кандидат химических наук, Акционерное общество «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ МЕДИАНА-ФИЛЬТР», 105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 1, e-mail: smirnov@mediana-filter.ru;

Сафонова Дарья Андреевна, Акционерно общество «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ МЕДИАНА-ФИЛЬТР», 105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 1, e-mail: safonova@mediana-filter.ru;

Якименко Светлана Ивановна, Акционерное общество «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ МЕДИАНА-ФИЛЬТР», 105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 1, e-mail: yakimenko@mediana-filter.ru

РЕЗИСТИВНАЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ ПАМЯТЬ (RERAM) НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ TaO_x: СТАТУС ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАЗРАБОТОК

Для удовлетворения взрывного спроса в устройствах энергонезависимой памяти с низким энергопотреблением, большой скоростью и ресурсом перезаписи, в мире ведутся масштабные исследования и разработки многочисленных концепций, альтернативных доминирующей в настоящее время технологии «флэш». При этом, память на основе эффекта обратимого резистивного переключения различной физической природы, имеют хорошие перспективы занять нишу устройств большой плотности с потенциально конкурентоспособными функциональными характеристиками. Среди материалов активных слоев, в которых реализуется эффект обратимого резистивного переключения, популярными являются наноразмерные слои оксидов переходных металлов, и среди них оксид тантала с различной стехиометрией по совокупности характеристик, а также с учетом его интеграции с современными КМОП-технологиями, является одним из наиболее перспективных кандидатов.

В настоящей работе описаны ранее не опубликованные результаты исследований на протяжении последнего десятилетия в области созданий резистивной памяти (ReRAM) на основе структур Ta/TaO_x/Pt, проводящихся в МФТИ в тесной кооперации с НИИМЭ и ПАО «Микрон». Показано, что при оптимизации параметров формируемых конденсаторных структур в элементах хранения, также интеграции с заводскими КМОП-транзисторами, возможно создание матриц 1024 × 1024 ячеек энергонезависимой памяти 1 транзистор-1 резистор (1T-1R) микронного размера в верхних слоях металлизации логических микросхем (BEOL-процесс) с временем перезаписи ~50 нс, ресурсом перезаписи 1010 (при «недеструктивном» считывании), временем хранения информации более 10 лет при T = 85 °C и сравнительно низким (~10 пДж) энергопотреблением на акт перезаписи.

Ключевые слова: энергонезависимая память, обратимое резистивное переключение, оксиды переходных металлов, оксид тантала, КМОП-технология, элемент хранения, ячейка памяти «1 транзистор – 1 резистор».

Сведения об авторах:

Жук Максим Юрьевич, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701, e-mail: maksimzhu1994@yandex.ru;

Горнев Евгений Сергеевич, доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701, e-mail: egornev@niime.ru;

Зенкевич Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701, e-mail: zenkevich.av@mipt.ru

ULTRAPURE WATER TREATMENT SYSTEMS

The article gives a brief historical review of the development of ultrapure water systems for semiconductor production. Reverse osmosis technology is the key technology in water treatment, boron removal, particle control, and final deionization of water.

Keywords: ultrapure water, reverse osmosis technology, boron removal.

Data of authors:

Vladimir Smirnov Bronislavovich, PhD in Chemical Sciences, Joint-Stock Company "NPK MEDIANA-FILTER", 1, Tkatskaya st., Moscow, 105318, e-mail: smirnov@mediana-filter.ru;

Daria Andreevna Safonova, Joint-Stock Company "NPK MEDIANA-FILTER", 1, Tkatskaya st., Moscow, 105318, e-mail: safonova@mediana-filter.ru;

Svetlana Ivanovna Yakimenko, JSC "NPK MEDIANA-FILTER", Joint-Stock Company "NPK MEDIANA-FILTER", 1, Tkatskaya st., Moscow, 105318, e-mail: yakimenko@mediana-filter.ru

RESISTIVE NON-VOLATILE MEMORY (RERAM) BASED ON TaO_x FUNCTIONAL LAYERS: STATUS OF DOMESTIC DEVELOPMENTS

To meet the explosive demand for non-volatile memory devices with low power consumption, high speed rewriting and endurance, extensive research and development is underway around the world on numerous alternative concepts to the currently dominant flash technology. Memories based on the effect of reversible resistive switching of various physical natures have good prospects for occupying the niche of high-density devices with potentially competitive functional characteristics. Among the materials of active layers in which the effect of reversible resistive switching is realized, nano-sized layers of transition metal oxides are popular, and among them, tantalum oxide with different stoichiometry is one of the most promising candidates in terms of a set of characteristics, as well as taking into account its integration with modern CMOS technologies. This paper describes previously unpublished results of research over the past decade in the field of creating prototype resistive memory (ReRAM devices based on Ta/TaO_x/Pt structures, carried out at MIPT in close cooperation with NIIME and PJSC Mikron.

It has been shown that by optimizing the parameters of the micron-size TaO_x based capacitor structures in storage elements, 1024 × 1024 matrices of 1 transistor-1 resistor (1T-1R) non-volatile memory cells can be produced by integrating storage elements with factory CMOS transistors in the upper metallization layers (BEOL process) of logic chips, exhibiting the rewriting time ~50 ns, endurance 1010 (with "non-destructive" readout), retention time of more than 10 years at T = 85 °C and relatively low (~10 pJ) energy consumption per rewriting act. The article gives a brief historical review of the development of ultrapure water systems for semiconductor production. Reverse osmosis technology is the key technology in water treatment, boron removal, particle control, and final deionization of water.

Keywords: non-volatile memory, reversible resistive switching, transition metal oxides, tantalum oxide, CMOS technology, storage element, memory cell, 1 transistor-1 resistor.

Data of authors:

Maxim Yurievich Zhuk, Moscow Institute of Physics and Technology (National research university), 9, Institutskiy lane, 141701, Dolgoprudny, Moscow region, e-mail: maksimzhu1994@yandex.ru;

Evgeny Sergeevich Gornev, D.Sc., prof., "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, 6/1, Ul. Academician Valieva, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, Moscow Institute of Physics and Technology (National research university), 9, Institutskiy lane, 141701, Dolgoprudny, Moscow region, e-mail: egornev@niime.ru;

Andrei Vladimirovich Zenkevich, Ph.D., Moscow Institute of Physics and Technology (National research university), 9, Institutskiy lane, 141701, Dolgoprudny, Moscow region, e-mail: zenkevich.av@mipt.ru

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ДИАЦЕТАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ С ВНЕДРЕННЫМИ В НИХ ПОЛЯРНЫМИ МОЛЕКУЛАМИ КОМПЛЕКСОВ НИТРАТОВ РЗЭ С КАРБАМИДОМ И АЦЕТАМИДОМ

Методом выпаривания растворов сформированы полимерные пленки диацетата целлюлозы (ДАЦ) с внедренными в них полярными молекулами $[\text{Pr}(\text{Ur})_4(\text{NO}_3)_3]$, $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Ur})_2(\text{NO}_3)_3]$, $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})(\text{Ur})_4(\text{NO}_3)_2\text{NO}_3]$, $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})(\text{AA})_3(\text{NO}_3)_3]$ (Ur – карбамид, AA – ацетамид). Результаты изучения температурных зависимостей диэлектрических проницаемости и потерь, а также токов термостимулированной деполяризации пленок указывают на формирование в модифицированных пленках долгоживущего электретоного состояния.

Ключевые слова: диацетат целлюлозы, полимерный электрет, полярный комплекс, термогравиметрический анализ, диэлектрическое свойство.

Сведения об авторах:

Титов Михаил Игоревич, Институт перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, e-mail: shupmp@yandex.ru;

Буш Александр Андреевич, доктор технических наук, профессор, НИИ материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, e-mail: aabush@yandex.ru;

Каменцев Константин Евгеньевич, кандидат технических наук, НИИ материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, e-mail: valkame@yandex.ru;

Агеева Татьяна Арсеньевна, кандидат химических наук, доцент Ивановского государственного химико-технологического университета, e-mail: tageeva@isuct.ru;

Савинкина Елена Владимировна, доктор химических наук, профессор кафедры Неорганической химии имени А.Н. Реформатского ИТХТ имени М.В. Ломоносова РТУ МИРЭА, e-mail: e.savinkina@mail.ru;

Караваяев Игорь Александрович, кандидат химических наук, ИТХТ имени М.В. Ломоносова РТУ МИРЭА, e-mail: mister.karavaev@inbox.ru;

Фомичев Валерий Вячеславович, доктор химических наук, профессор кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов имени К.А. Большакова ИТХТ им. М.В. Ломоносова РТУ МИРЭА, e-mail: valeryfom@rambler.ru

DIELECTRIC PROPERTIES OF CELLULOSE DIACETATE POLYMER FILMS WITH POLAR MOLECULES EMBEDDED IN THEM COMPLEXES OF REE NITRATES WITH CARBAMIDE AND ACETAMIDE

Polymer films of diacetate cellulose (DAC) with polar molecules embedded in them $[\text{Pr}(\text{Ur})_4(\text{NO}_3)_3]$, $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Ur})_2(\text{NO}_3)_3]$, $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})(\text{Ur})_4(\text{NO}_3)_2\text{NO}_3]$, $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})(\text{AA})_3(\text{NO}_3)_3]$ (Ur – carbamide, AA – acetamide) were formed by evaporation of solutions. The results of studying the temperature dependences of dielectric permittivity and losses, as well as the currents of thermally stimulated depolarization of films indicate the formation of a long-lived electret state in modified films.

Keywords: cellulose diacetate, polymer electret, polar complex, thermogravimetric analysis, dielectric property.

Data of authors:

Titov Mikhail Igorevich, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA, e-mail: shupmp@yandex.ru;

Bush Alexander Andreevich, Doctor of Technical Sciences, professor, Research Institute of Solid-State Electronics Materials, MIREA – Russian Technological University, e-mail: aabush@yandex.ru;

Kamencev Konstantin Evgenievich, Candidate of Technical Sciences, Scientific Research Institute of Solid State Electronics Materials RTU MIREA, e-mail: valkame@yandex.ru;

Ageeva Tatyana Arsenyevna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Ivanovo State University of Chemistry and Technology, e-mail: tageeva@isuct.ru;

Savinkina Elena Vladimirovna, Doctor of Chemical Sciences, professor of the Department Inorganic Chemistry named after A.N. Reformatzky, M.V. Lomonosov ITHT RTU MIREA, e-mail: e.savinkina@mail.ru;

Karavaev Igor Alexandrovich, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Faculty. Inorganic Chemistry named after A.N. Reformatzky, M.V. Lomonosov ITHT RTU MIREA, e-mail: mister.karavaev@inbox.ru;

Fomichev Valery Vyacheslavovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanoscale and Composite Materials named after K.A. Bolshakov, M.V. Lomonosov ITHT RTU MIREA; e-mail: valeryfom@rambler.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ЧАСТЬ 2. НАСУЩНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Цифровой мир невозможен без полупроводниковых приборов, а производство интегральных схем – базовая отрасль и исходный пункт формирования производственных цепей поставок электроники различных типов и назначения. Сколько бы мы не говорили о «высоких» технологиях и даже нанотехнологиях, но все современные достижения обязаны сейчас и будут обязаны и завтра, и после завтра микроэлектронике и ее технологиям. Микроэлектроника, а точнее элементная база, создаваемая ею, дает возможность просчитать, смоделировать устройство, машину, ситуацию, развитие болезней и, даже, события. В свою очередь, полупроводниковая промышленность, изготавливающая изделия микроэлектроники, в своем развитии опирается на поставщиков оборудования и материалов. Проблемы микроэлектроники имеют отношения ко всему, с чем Россия имеет дело. Для большинства людей полупроводниковые приборы – своего рода невидимки, в крайнем случае, «финтифлюшки», скрытые внутри интеллектуальных динамиков, смартфонов, оборудования центров обработки и хранения данных (ЦОД). Компании, занимающиеся информатикой, цифровизацией присвоили смысл термина «технологии» и большую часть заслуг в развитии цифрового мира. Но все меняется – и в центр внимания снова становятся полупроводниковые приборы.

Ключевые слова: интегральные микросхемы, промышленная технология, качество, надежность, дефектность, выход годных, отказы.

Сведения об авторе:

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: egornev@niime.ru

MODERN INTEGRATED CIRCUITS RELIABILITY ASSURANCE PART 2. CURRENT ISSUES

No digital world is possible without semiconductor devices. Integrated circuits manufacturing is a basic industry and it is a starting point for formation of production supply chains for various types of electronics and its applications. No matter how much one talks about high tech and nanotechnologies all the current achievements are due to microelectronics that will remain their basis tomorrow and onwards. Microelectronics in general or rather its component base makes it possible to calculate a model for device, for mechanism, for system condition, for disease evolution and even for events. In its turn the semiconductor industry which fabricates microelectronic devices relies on equipment and materials suppliers. The challenges that microelectronics meets nowadays are touching everything whatever Russia deals with. For most of the people, semiconductor devices are imperceptible like a kind of trinkets hidden inside smart speakers, smartphones or data center equipment. Companies involved in IT and digital applications have monopolized the mean of “technology” term and much of the credit for the development of the digital world. However reality appreciation changes and semiconductor devices are returning back to the focus of attention.

Keywords: integrated microcircuits, industrial process, quality, reliability, defectiveness, yield, failures.

Data of authors:

Evgeniy Sergeevich Gornev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Joint Stock Company «Research Institute of Molecular Electronics», 6/1, st. Academician Valieva, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: egornev@niime.ru