

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 3(191) 2023

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Выпуск 3(191) 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

Ваклапов М. Р., 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 Киирович, к. т. н.**Критенко Михаил Иванович,** к. т. н.**Maev Roman Gr.,** Dr. Sc.**Петричкович Ярослав Ярославович,**

д. т. н.

Рошупкин 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.А. Горохов, А.А. Резванов, А.А. Резник**Энергетические барьеры миграции точечных дефектов в TiN
из первых принципов 5**Разработка и конструирование****В.В. Макеев**

Сравнительный анализ RERAM на базе high-k диэлектриков 14

**П.А. Паташев, Е.О. Белоусов, Д.В. Кочетков, К.М. Моленкамп,
А.В. Эннс**Генератор частоты с системой ФАПЧ расширенного диапазона
с автоматической коррекцией вольт-частотной характеристики
для применения в высокоскоростных устройствах сериализации-
десериализации 19**Ю.А. Чаплыгин, В.В. Лосев, А.И. Хлыбов, Д.В. Родионов,
Е.Ю. Котляров, В.И. Егоркин**Исследования зависимости коэффициента шума GaN HEMT
транзисторов от режимов работы 29**Yu.A. Chaplygin, V.V. Iosev, A.I. Khlybov, D.V. Rodionov,
E.Yu. Kotlyarov, V.I. Egorkin**A survey of noise figure response to operating modes in GaN HEMT
transistors 37**Процессы и технология****А.А. Резванов, Д.С. Серегин, В.А. Гвоздев, А.С. Вишнеvский,
П.И. Кузнецов, С.А. Горохов, Е.Н. Морозов, К.А. Воротилов**

Субтрактивный процесс формирования системы металлизации 44

**A.A. Rezvanov, D.S. Seregin, V.A. Gvozdev, A.S. Vishnevskiy,
P.I. Kuznetsov, S.A. Gorokhov, E.N. Morozov, K.A. Vorotilov**

The subtractive process of forming a metallization system 59

С.И. Патюков, М.В. Черняев, С.А. Горохов, А.А. РезвановНизкотемпературное окисление кремния с использованием
генератора озона 73**Аннотации** 80

**“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.A. Gorokhov, A.A. Rezvanov, A.A. Reznik

Energy barriers of point defects migration in TiN from first principles 5

Development and designing

V.V. Makeev

Comparative analysis of high-k dielectric RERAM 14

P.A. Patashev, E.O. Belousov, D.V. Kochetkov,

K.M. Molenkamp, A.V. Enns

A frequency generator with an extended-range PLL system with
automatic correction of the volt-frequency response for use in high-
speed serialization-deserialization devices 19

Yu.A. Chaplygin, V.V. Iosev, A.I. Khlybov, D.V. Rodionov,

E.Yu. Kotlyarov, V.I. Egorkin

A survey of noise figure response to operating modes in GaN HEMT
transistors 29, 37

Processes and technology

A.A. Rezvanov, D.S. Seregin, V.A. Gvozdev, A.S. Vishnevskiy,

P.I. Kuznetsov, S.A. Gorokhov, E.N. Morozov, K.A. Vorotilov

The subtractive process of forming a metallization system 44, 59

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

Low-temperature oxidation of silicon using an ozone generator 73

Abstracts 80

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 191-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».

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

Номер открывается разделом «Физические явления», где авторами в рамках теории функционала плотности рассмотрена объемная диффузия по междоузельному механизму и по механизму вакансий примесного атома Si в гранецентрированной кубической структуре нитрида титана. Приведены оценки корреляционного множителя для диффузии по вакансионному механизму, получены зависимости изменения межатомных расстояний при миграции Si, а также продемонстрировано изменение плотности электронных состояний при скачке примесного атома Si на близлежащую вакансию титана.

В первой статье следующего раздела «Разработка и конструирование» приведено сравнение некоторых ожидаемых электрических характеристик элементов резистивной энергонезависимой памяти (PERAM) на базе high-*k* диэлектриков и сделан вывод о том, что наиболее быстродействующими должны быть структуры на основе оксидов тантала и гафния, а наихудшие характеристики по скорости переключения должны иметь структуры на базе Al₂O₃. Во второй работе представлена разработка и анализ генератора с системой ФАПЧ для применения в высокоскоростных устройствах сериализации-десериализации.

В третьей статье данного раздела приведены результаты исследований зависимостей коэффи-



циента шума и коэффициента усиления GaN НЕМТ транзисторов от режимов работы в L-диапазоне частот (1–2 ГГц). Отмечено, что минимальные измеренные значения коэффициента шума (менее 1,0 дБ) находятся в диапазоне напряжений на стоке (2,5–5,5) В и плотностей тока стока 40–80 мА/мм.

В первой статье заключительного раздела «Процессы и технология» исследован процесс субтрактивной интеграции формирования системы металлизации, снимающий ограничения, связанные с деструкцией low-*k* диэлектрика в процессе плазмохимического травления и ростом сопротивления проводников при уменьшении их размера в существующем Damascene процессе. Во второй работе исследуется кинетика низкотемпературного радикального окисления кремния в потоке озона, сформированном в озонаторе (генераторе озона).

Приглашаем всех заинтересованных читателей к сотрудничеству!

С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН

Г.Я. Красников

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ МИГРАЦИИ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В TiN ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Рассмотрена объёмная диффузия по междоузельному механизму и по механизму вакансий примесного атома Cu в гранецентрированном кубическом нитриде титана. Рассчитаны из первых принципов в рамках теории функционала плотности по методу восходящих изображений значения энергетических барьеров миграции атомов меди на обеих подрешётках монокристаллического TiN и по междоузельным положениям, а также энергетические барьеры миграции вакансий в окрестности примесного атома Cu. Проведены оценки корреляционного множителя для диффузии по вакансионному механизму, получены зависимости изменения межатомных расстояний при миграции Cu, а также продемонстрировано изменение плотности электронных состояний при скачке примесного атома Cu на близлежащую вакансию титана.

Ключевые слова: диффузия, нитрид титана, энергетический барьер миграции, дефекты, теория функционала плотности.

Сведения об авторах:

Горохов Сергей Александрович, Научно-образовательный центр «Технологический центр», Московский Физико-Технический Институт; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, Академика Валиева 6/1, e-mail: sgorohov@niime.ru

Резванов Аскар Анварович кандидат физико-математических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»; Российский Технологический Университет «МИРЭА»; Научно-образовательный центр «Технологический центр», Московский Физико-Технический Институт; Москва, Зеленоград, Академика Валиева 6/1; e-mail: arezvanov@niime.ru

Резник Александр Анатольевич, Московский Физико-Технический Институт; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, Академика Валиева 6/1; e-mail: alreznik@niime.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ RERAM НА БАЗЕ HIGH-K ДИЭЛЕКТРИКОВ

Приведено сравнение некоторых ожидаемых электрических характеристик элементов резистивной энергонезависимой памяти (RERAM) на базе high-k диэлектриков путём сравнительного анализа электрофизических характеристик диэлектриков. Сделан вывод о том, что наиболее быстродействующими должны быть структуры на основе оксидов тантала и гафния, наихудшие характеристики по скорости переключения должны иметь структуры на базе Al_2O_3 .

Ключевые слова: high-k диэлектрики, электронная структура, прочность связей, кислородные вакансии, дрейф ионов кислорода в оксидах, токопроводящий филамент, перенос заряда по вакансиям.

Сведения об авторе:

Макеев Виктор Владимирович, кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, стр. 1, e-mail: vmakeev@niime.ru

ENERGY BARRIERS OF POINT DEFECTS MIGRATION IN TiN FROM FIRST PRINCIPLES

The copper impurity diffusion in the bulk fcc TiN via the interstitial and vacancy mechanisms is considered. The migration energy barriers of copper atoms on both Ti and N sublattices of monocrystalline TiN and on interstitial positions, as well as the migration energy barriers of vacancies in the vicinity of the Cu impurity atom, calculated from the first principles within the framework of density functional theory by the Climbing Nudged Elastic Band Method (CI-NEB) are presented. Estimates of the correlation factor for diffusion by the vacancy mechanism are carried out, the dependences of the change in interatomic distances during Cu migration are presented, and the change in the density of electronic states during the jump of an impurity Cu atom to a nearby titanium vacancy is demonstrated.

Keywords: diffusion, titanium nitride, migration energy barrier, defects, density functional theory.

Data of authors:

Gorokhov Sergei Aleksandrovich, Research and Educational Center «Technological Center» Moscow Institute of Physics and Technology, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: sgorohov@niime.ru

Rezvanov Askar Anvarovich, Ph.D, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Russian Technological University «MIREA», Research and Educational Center «Technological Center» Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: arezvanov@niime.ru

Reznik Aleksandr Anatolievich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: alreznik@niime.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH-K DIELECTRIC RERAM

A comparison of some expected electrical characteristics of high-k dielectric resistive nonvolatile memory (RERAM) elements is provided by comparative analysis of electrophysical characteristics of dielectrics. It was concluded that the structures based on tantalum and hafnium oxides should be the fastest, the worst characteristics in terms of switching speed should have structures based on Al_2O_3 .

Keywords: high-k dielectrics, electronic structure, bond strength, oxygen vacancies, oxygen ion drift in oxides, conductive filament, charge transfer by vacancies.

Data of author:

Makeev Viktor Vladimirovich, PhD, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia, e-mail: vmakeev@niime.ru

ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТЫ С СИСТЕМОЙ ФАПЧ РАСШИРЕННОГО ДИАПАЗОНА С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВОЛЬТ-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УСТРОЙСТВАХ СЕРИАЛИЗАЦИИ-ДЕСЕРИАЛИЗАЦИИ

Представлена разработка и анализ генератора с системой ФАПЧ для применения в высокоскоростных устройствах сериализации-десериализации. Предложенный генератор обладает расширенным диапазоном поддерживаемых частот от 0,5 до 2,5 ГГц и низким значением суммарного джиттера в 19 пс. Воспроизводимость передаточной характеристики генератора частоты, низкое значение джиттера и расширенный диапазон частот достигаются при помощи предложенной схемы автоматической коррекции.

Ключевые слова: ФАПЧ, сериалайзер-десериалайзер, ГУН, автоматическая коррекция.

Сведения об авторах:

Паташев Павел Алексеевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: ppatashev@niime.ru

Белусов Егор Олегович, кандидат технических наук,

АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: ebelousov@niime.ru

Кочетков Дмитрий Валерьевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: dkochetkov@niime.ru

Моленкамп Ксения Михайловна, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: kmolenkamp@niime.ru

Эннс Александр Викторович, кандидат технических наук,

АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: aenns@niime.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА GaN HEMT ТРАНЗИСТОРОВ ОТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

В статье приведены результаты исследований зависимостей коэффициента шума и коэффициента усиления GaN HEMT транзисторов от режимов работы в L-диапазоне частот (1...2 ГГц). Отмечено, что минимальные измеренные значения коэффициента шума (менее 1,0 дБ) находятся в диапазоне напряжений на стоке 2,5...5,5 В и плотностей тока стока 40...80 мА/мм. Минимальный коэффициент шума (NF_{min}) имеет значение не более 0,65 дБ.

Ключевые слова: коэффициент шума, NF, минимальный коэффициент шума, NF_{min} , Y-фактор, избыточный коэффициент шума, ENR, GaN HEMT, S-параметры, время-импульсная рефлектометрия.

Сведения об авторах:

Чаллыгин Юрий Александрович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, 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: president@miet.ru

Лосев Владимир Вячеславович, доктор технических наук, профессор, 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

Хлыбов Александр Иванович, кандидат технических наук, 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: alex1818@yandex.ru

Родионов Денис Владимирович, 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: denis.rodionov@gmail.com

Котляров Евгений Юрьевич, 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: ekotlyarov@niime.ru

Егоркин Владимир Ильич, кандидат технических наук, 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: egorkinvi1962@mail.ru

A FREQUENCY GENERATOR WITH AN EXTENDED-RANGE PLL SYSTEM WITH AUTOMATIC CORRECTION OF THE VOLT-FREQUENCY RESPONSE FOR USE IN HIGH-SPEED SERIALIZATION-DESERIALIZATION DEVICES

The development and analysis of a generator with a PLL system for use in high-speed serialization-deserialization devices is presented. The proposed generator has an extended range of supported frequencies from 0.5 to 2.5 GHz and a low total jitter value of 19 ps. Reproducibility of the frequency generator transfer characteristics, low jitter value and extended frequency range are achieved using the proposed automatic correction circuit.

Keywords: PLL, SerDes, VCO, automatic correction.

Data of authors:

Pavel Alekseevich Patashev., Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: ppatashev@niime.ru

Egor Olegovich Belousov., Candidate of Engineering Science, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: ebelousov@niime.ru

Dmitry Valerievich Kochetkov., Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: dkochetkov@niime.ru

Ksenia Mikhailovna Molenkamp., Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: kmolenkamp@niime.ru

Aleksandr Viktorovich Enns, Candidate of Engineering Science, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: aenns@niime.ru

GAN HEMT TRANSISTORS OPERATING MODES NOISE COEFFICIENT DEPENDENCE RESEARCH

This paper contain experimental results for GaN HEMT noise figure and gain as functions of operating mode for L-band (1 – 2 GHz). It was pointed that minimum noise figure values (less than 1 dB) was measured for 2.5 – 5.5 V drain voltage and density current 40 – 80 mA/mm. Minimum noise figure (NF_{min}) was less than 0.65 dB.

Keywords: noise figure, NF, noise figure minimum, NF_{min} , Y-factor, excess noise ratio, ENR, GaN HEMT, s-parameters, time-domain reflectometry.

Data of authors:

Chaplygin Yuriy Aleksandrovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science Engineering, Professor, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: president@miet.ru

Lossev Vladimir Vyacheslavovich, Doctor of Engineering Sciences, professor, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: dsd@miee.ru

Khlybov Aleksander Ivanovich, Candidate of Engineering Sciences, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: alex1818@yandex.ru

Rodionov Denis Vladimirovich, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: denis.rodionov@gmail.com

Kotlyarov Evgeny Yurievich, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: ekotlyarov@niime.ru

Egorkin Vladimir Ilyich, Candidate of Engineering Sciences, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: egorkinvi1962@mail.ru

СУБТРАКТИВНЫЙ ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Исследован субтрактивный процесс создания системы металлизации интегральных схем. В качестве модельных использованы структуры с алюминиевыми и медными проводниками, имеющие различный шаг. Заполнение зазоров между проводниками проводилось методом химического осаждения из раствора. Сформированные органосиликатные слои обеспечивали полную или частичную планаризацию рельефа. Электрические измерения свидетельствовали о снижении емкости и токов утечек в структурах с нанопористыми диэлектрическими слоями.

Ключевые слова: заполнение зазора между проводниками, планаризация, органосиликат, метил-модифицированный силикат, low-k диэлектрик, химическое осаждение из раствора, центрифугирование.

Сведения об авторах:

- Резванов Аскар Анварович, кандидат физико-математических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1; Российский Технологический Университет «МИРЭА»; Научно-образовательный центр «Технологический центр», Московский Физико-Технический Институт; e-mail: arezvanov@niime.ru
- Серёгин Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, Российский Технологический Университет «МИРЭА», Научно-образовательный центр «Технологический центр» Москва, пр. Вернадского, 78, e-mail: bxz1111@yandex.ru
- Гвоздев Владимир Александрович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева 6/1, e-mail: vgvvozdev@niime.ru
- Вишневский Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, Российский Технологический Университет «МИРЭА», Научно-образовательный центр «Технологический центр», Москва, пр. Вернадского, 78, e-mail: alexeysw@mail.ru
- Кузнецов Павел Игоревич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева 6/1, e-mail: pkuznecov@niime.ru
- Горохов Сергей Александрович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева 6/1; Московский Физико-Технический Институт, e-mail: sgorohov@niime.ru
- Морозов Евгений Николаевич, АО «Микрон», Москва, Зеленоград, Академика Валиева 6/1, e-mail: emorozov@mikron.ru
- Воротилов Константин Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Российский Технологический Университет «МИРЭА», Научно-образовательный центр «Технологический центр», Москва, пр. Вернадского, 78, e-mail: vorotilov@live.ru

THE SUBTRACTIVE PROCESS OF FORMING A METALLIZATION SYSTEM

The subtractive process of forming a metallization system for integrated circuits has been studied. Structures with aluminum and copper conductors with different pitches were used as models. The gaps between the conductors were filled using the chemical solution deposition technique. The formed organosilicate layers provided complete or partial planarization of the relief. Electrical measurements indicated a decrease in capacitance and leakage currents in structures with nanoporous dielectric layers.

Keywords: gap-filling, planarization, organosilicate, methyl-modified silicate, low-k dielectric, chemical solution deposition, spin-on.

Data of authors:

- Rezvanov Askar Anvarovich, Ph.D, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Russian Technological University «MIREA», Research and Educational Center «Technological Center» Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: arezvanov@niime.ru
- Seregin Dmitry Sergeevich, Ph.D, Russian Technological University «MIREA», Research and Educational Center «Technological Center», Moscow, Vernadskogo ave., 78, e-mail: bxz1111@yandex.ru
- Gvozdev Vladimir Aleksandrovich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: vgvvozdev@niime.ru
- Vishnevskiy Alexey Sergeevich, Ph.D, Russian Technological University «MIREA», Research and Educational Center «Technological Center», Moscow, Vernadskogo ave., 78, e-mail: alexeysw@mail.ru
- Kuznetsov Pavel Igorevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: pkuznecov@niime.ru
- Gorokhov Sergei Aleksandrovich, Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: sgorohov@niime.ru
- Morozov Evgeniy Nikolaevich, Joint Stock Company «Mikron», Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: emorozov@mikron.ru
- Vorotilov Konstantin Anatolevich, Dr., Professor, Russian Technological University «MIREA», Research and Educational Center «Technological Center», Moscow, Vernadskogo ave., 78, e-mail: vorotilov@live.ru

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА

В работе исследуется кинетика низкотемпературного радикального окисления кремния в потоке озона, сформированном в озонаторе (генераторе озона). Полученные данные подтверждают уникальные возможности процесса низкотемпературного окисления в озоне – возможность формирования тонкого оксида кремния толщиной 10...20 Å при температуре 500°C, что примерно на 150...200 градусов ниже, чем для существующего процесса ISSG окисления.

Ключевые слова: радикальное окисление, кинетика роста оксида кремния, окисление в озоне, генератор озона.

Сведения об авторе:

Патыков 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

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;

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

LOW-TEMPERATURE OXIDATION OF SILICON USING AN OZONE GENERATOR

The kinetics of low-temperature radical oxidation of silicon in an ozone stream formed in an ozone generator is investigated. The data obtained confirm the unique properties of the low-temperature oxidation process in ozone – the possibility of forming a thin silicon oxide with a thickness of 10-20 Å at a temperature of 500° C, which is about 150–200 degrees lower than for the existing ISSG oxidation process.

Keywords: radical oxidation, kinetics of silicon oxide growth, oxidation by ozone, ozone generator.

Data of author:

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

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

Gorokhov Sergey Aleksandrovich, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: sgorohov@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; 6/1, Akademika Valieva street, Zelenograd, Russia, 123460, e-mail: arezvanov@niime.ru.