

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 1(197) 2025

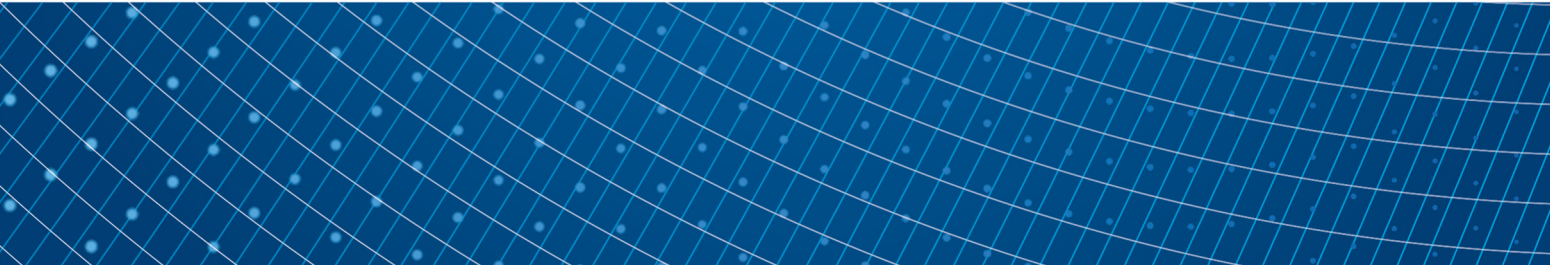
ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 1(197) 2025

Москва, 2025



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

д. ф.-м. н., академик РАН

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

д. ф.-м. н., академик РАН

Бокарев Валерий Павлович,

ответственный секретарь, д. т. н.

Бугаев Александр Степанович,

д. ф.-м. н., академик РАН

Быков Виктор Александрович,

д. т. н.

Галиев Галиб Бариевич, д. ф.-м. н.**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****В.П. Драгунов, Д.И. Остертак, Д.М. Казымов,****Е.Ю. Коваленко, М.А. Кузнецов.** Транзисторный делитель
напряжения для МЭМС на переключаемых конденсаторах 5**Процессы и технология****Р.М. Гиниятуллин, М.В. Цепкин, А.М. Ефремов, В.Б. Бетелин.**Параметры плазмы и кинетика активных частиц в бромистом
водороде: возвращение к вопросу 19**М.С. Кульпинов, М.Г. Путря, А.А. Голишников, А.В.****Шишлянников, Е.С. Горнев.** Метод снижения LER-эффекта
при создании элементов интегральной фотоники 33**M.S. Kulpinov, M.G. Putrya, A.A. Golishnikov,****A.V. Shishlyannikov, E.S. Gornev.** Method of reducing LER-effect
when creating elements of integrated photonics 39**Н.А. Кузнецова.** Неровность края элементов, формируемых
фоторезистами с химическим усилением 44**О.А. Тельминов, Н.В. Воронова, С.И. Янович, Д.А. Винник,****А.С. Чернуха.** Анализ параметров транзисторов, полученных
печатными методами 53**Математическое моделирование****М.Ю. Барабаненков.** Функция Грина и Т-оператор рассеяния
в задачах о распространении плазмонных и спиновых волн
в открытых и закрытых диэлектрических и магнитных

структурах 64

С.А. Горохов, А.А. Резник, А.А. Резванов.Термодинамические свойства гексагональной и кубической фаз
рутения в квазигармоническом приближении 64**S.A. Gorokhov, A.A. Reznik, A.A. Rezvanov.** Thermodynamic
properties of hexagonal and cubic phases of ruthenium from
the quasi-harmonic approximation 64**Аннотации**Журнал 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

**V.P. Dragunov, D.I. Ostertak, D.M. Kazymov, E.Y. Kovalenko,
M.A.Kuznetsov.** Transistor voltage divider for MEMS based
on switched capacitors 5

Processes and technology

R.M. Giniyatullin, M.V. Tsepkin, A.M. Efremov, V.B. Betelin.
Plasma parameters and active species kinetics in hydrogen bromide:
revisited again 19

**M.S. Kulpinov, M.G. Putrya, A.A. Golishnikov,
A.V. Shishlyannikov, E.S. Gornev.** Method of reducing LER-effect
when creating elements of integrated photonics 33, 39

N.A. Kuznetsova. Line edge roughness generated in chemically
amplified photoresist 44

**O.A. Telminov, N.V. Voronova, S.I. Yanovich, D.A. Vinnik,
A.S. Chernukha.** Examination of transistor characteristics derived
through printed technologies 53

Mathematical simulation

M.Yu. Barabanenkov. Green's function and T-scattering operator
in plasmonic and spin wave propagation problems in open and closed
dielectric and magnetic structures 64

S.A. Gorokhov, A.A. Reznik, A.A. Rezvanov. Thermodynamic
properties of hexagonal and cubic phases of ruthenium from
the quasi-harmonic approximation

Abstracts

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 (HAC)

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МЭМС НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований особенностей работы бестрансформаторных делителей напряжения с транзисторно-диодной коммутацией переключаемых конденсаторов для микроэлектромеханических систем. Проведён анализ особенностей функционирования делителей при работе от постоянно подключённого или подключаемого периодически источника напряжения V_0 неограниченной мощности. Установлено, что КПД делителя при работе от постоянно подключённого первичного источника напряжения V_0 неограниченной мощности очень мал, а при работе от такого источника, подключаемого периодически, может достигать 60%. Установлено, что, в схемах с транзисторно-диодной коммутацией конденсаторов стабилизирующий эффект значительно сильнее, чем в схемах с диодной коммутацией конденсаторов.

Ключевые слова: делитель напряжения, собственная ёмкость диодов, сопротивление нагрузки, переключаемые конденсаторы, аналитические выражения.

Сведения об авторах:

Драгунов Валерий Павлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: dragunov@corp.nstu.ru;

Остертak Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ) 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: ostertak@corp.nstu.ru;

Казымов Дмитрий Максимович, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: dimakazymov@rambler.ru;

Коваленко Екатерина Юрьевна, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: kk3444377@gmail.com

Кузнецов Максим Андреевич, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: m.kuznetsov@corp.nstu.ru

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ И КИНЕТИКА АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ В БРОМИСТОМ ВОДОРОДЕ: ВОЗВРАЩЕНИЕ К ВОПРОСУ

Проведено исследование электрофизических параметров и состава плазмы ВЧ (13,56 МГц) индукционного разряда в бромистом водороде. Предложена и верифицирована модель плазмы, корректирующая недостатки предшествующих работ в плане учёта гетерогенной рекомбинации атомов и температуры газа. Изучены и интерпретированы механизмы влияния давления газа и вкладываемой мощности на стационарные концентрации нейтральных и заряженных частиц. Проведён модельный анализ поведения скоростей травления при высокой и низкой летучести продуктов взаимодействия.

Ключевые слова: бромистый водород, плазма, ионизация, диссоциация, кинетика, скорость травления, параметры плазмы.

Сведения об авторах:

Гиниятуллин Руслан Маратович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», ул. Академика Валиева, 6/1, Зеленоград, Москва, 124460, Россия, e-mail: rginiyatullin@mail.ru;

Михаил Викторович Цепкин, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», ул. Академика Валиева, 6/1, Зеленоград, Москва, 124460, Россия, e-mail: mtsepk@niime.ru;

Александр Михайлович Ефремов, доктор химических наук, профессор, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», ул. Академика Валиева, 6/1, Зеленоград, Москва, 124460, Россия, e-mail: aefremov@niime.ru;

Владимир Борисович Бетелин, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»-НИИСИ, Нахимовский просп., 36, к. 1, Москва, Российская федерация, 117218, e-mail: betelin@niisi.msk.ru

TRANSISTOR VOLTAGE DIVIDER FOR MEMS BASED ON SWITCHED CAPACITORS

The results of experimental and theoretical studies of the operation of transformerless voltage dividers with transistor-diode commutation of switchable capacitors for microelectromechanical systems are presented. The analysis of the divider features during operation with a constantly connected or periodically connected voltage source V_0 with unlimited power is carried out. It has been found that the efficiency of the divider during operation from a permanently connected primary voltage source V_0 with unlimited power is very small, but during the operation from this source connected periodically, it can reach 60%. It has been found that for the circuits with transistor-diode commutation of capacitors the stabilizing effect is much stronger than for circuits with diode switching of capacitors.

Keywords: voltage divider, intrinsic capacitance of diodes, load resistance, switchable capacitors, analytical expressions.

Data of authors:

Dragunov Valery Pavlovich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of semiconductor devices and microelectronics department, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: dragunov@corp.nstu.ru;

Ostertak Dmitry Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: ostertak@corp.nstu.ru;

Kazymov Dmitry Maksimovich, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: dimakazymov@rambler.ru;

Kovalenko Ekaterina Yurievna, undergraduate student of semiconductor devices and microelectronics department, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: kk3444377@gmail.com;

Kuznetsov Maksim Andreevich, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: m.kuznetsov@corp.nstu.ru

PLASMA PARAMETERS AND ACTIVE SPECIES KINETICS IN HYDROGEN BROMIDE: REVISITED AGAIN

The investigation of electro-physical plasma parameters and composition under conditions of RF (13,56 MHz) inductive discharge was carried out. The model revising drawbacks of previous works in respect to heterogeneous loss of atomic species and gas temperature was suggested and verified. Mechanisms determining the influence of gas pressure and input power on steady-state densities of neutral and charged species were studied and explained. The model-based analysis of etching rate behaviors in cases of high and low volatile reaction products was performed.

Keywords: Hydrogen bromide, plasma, ionization, dissociation, kinetics, etching rate, plasma parameters.

Data of authors:

Ruslan Maratovich Giniyatullin, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, Academic Valiev st., 6/1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: rginiyatullin@mail.ru;

Mikhail Viktorovich Tsepk, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, Academic Valiev st., 6/1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: mtsepk@niime.ru;

Alexander Mikhailovich Efremov, Doctor of Chemistry, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, Academic Valiev st., 6/1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: aefremov@niime.ru;

Vladimir Borisovich Betelin, Doctor of Physics and Mathematics professor, academic of RAS, Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre «Kurchatov Institute» Nakhimovskiy ave., 36, bld. 1, Moscow, 117218, Russia, e-mail: betelin@niisi.msk.ru

МЕТОД СНИЖЕНИЯ LER-ЭФФЕКТА ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКИ

В статье проанализированы и представлены основные факторы, способствующие появлению LER-эффекта, особенности передачи искажений маски в создаваемые структуры, а также методы исследования неровностей краёв линий маски и морфологии поверхности формируемых наноразмерных структур. Проанализировано влияние литографического процесса и технологии переноса рисунков элементов фотонных интегральных схем на качество поверхности создаваемых структур. Исследованы причины изменения морфологии и ключевые факторы, влияющие на LER-эффект, предложены возможные решения. Описаны методы и предложена экспериментальная технология для уменьшения неровностей фоторезистивной маски, влияющие на характеристики ИС и фотонных интегральных схем, включая оптимизацию процесса фотолитографии, использование специализированных материалов и технологий их нанесения для создания слоёв антиотражающих покрытий и жёстких масок, а также применение дополнительных технологий и методов обработки поверхности формируемых слоёв.

Ключевые слова: LER; LWR; неровности фоторезистивной маски, фотонные интегральные схемы, шероховатость ширины линии.

Сведения об авторах:

Кульпин Михаил Сергеевич, 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;

Голишиников Александр Анатольевич, кандидат 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: golishnikov1960@mail.ru;

Путря Михаил Георгиевич, 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: mishapmg@gmail.com;

Шишлянников Антон Валерьевич, кандидат физико-математических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр-д, дом 6, строение 1, e-mail: ashishlyannikov@niime.ru;

Горнев Евгений Сергеевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр-д, дом 6, строение 1, e-mail: egornev@niime.ru

METHOD OF REDUCING LER-EFFECT WHEN CREATING ELEMENTS OF INTEGRATED PHOTONICS

The paper analyses and presents the main factors contributing to the LER effect, the features of mask distortion transfer to the created structures, as well as methods of investigating the roughness of mask line edges and surface morphology of the formed nanoscale structures. The influence of the lithographic process and the technology of transferring patterns of photonic integrated circuits elements on the surface quality of the created structures is analysed. The causes of morphology change and key factors influencing the LER-effect are investigated, and possible solutions are proposed. Methods are described and experimental technology is proposed to reduce the roughness of the photoresistive mask affecting the characteristics of ICs and photonic integrated circuits, including the optimisation of the photolithography process, the use of special materials and technologies of their application to create layers of anti-reflection coatings and rigid masks, as well as the use of additional technologies and methods of surface treatment of the formed layers.

Keywords: LER; LWR; photoresistive mask roughness, photonic integrated circuits, line width roughness.

Data of authors:

Kulpinov Mikhail Sergeyevich, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education 'National Research University 'Moscow Institute of Electronic Technology', 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina Square, 1, e-mail: kulpms@gmail.com;

Golishnikov Alexander Anatolievich, candidate of Technical Sciences, associate professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education 'National Research University 'Moscow Institute of Electronic Technology', 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina Square, 1, e-mail: golishnikov1960@mail.ru;

Putrya Mikhail Georgievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education 'National Research University 'Moscow Institute of Electronic Technology', 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina Square, 1, e-mail: mishapmg@gmail.com;

Shishlyannikov Anton Valeryevich, candidate of Technical Sciences, 'Molecular Electronics Research Institute', Stock Company, 124460, Moscow, Zelenograd, 1st Western Prospect, 6, building 1. e-mail: ashishlyannikov@niime.ru;

Gornev Evgeny Sergeyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, 'Molecular Electronics Research Institute', Stock Company, 124460, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva 6/1, e-mail: egornev@niime.ru

**НЕРОВНОСТЬ КРАЯ ЭЛЕМЕНТОВ,
ФОРМИРУЕМЫХ ФОТОРЕЗИСТАМИ С ХИМИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ**

В обзоре рассмотрены химические и физико-химические основы явлений, приводящих к возникновению неровности края наноразмерных топологических структур, формируемых фоторезистами с химическим усилением, а также приемы, позволяющие снизить её уровень и повысить разрешающую способность.

Ключевые слова: фоторезист; химическое усиление; неровность края элемента.

Сведения об авторе:

Кузнецова Нина Александровна; доктор химических наук;

АО «Научно-исследовательский институт органических полупроводников и красителей», 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, д. 7, e-mail: nakuznetsova@niopik.ru

**АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПЕЧАТНЫМИ МЕТОДАМИ**

В статье рассмотрены перспективы развития печатной электроники в части изготовления активных элементов – полевых транзисторов, – с помощью технологий струйной и аэрозольной печати с частичным применением методов фотолитографии для изготовления элементов структуры с более высоким разрешением. Проведен сравнительный анализ достигнутых результатов мирового уровня для получения оценочных характеристик рассматриваемых приборов, в частности скорости носителей заряда и отношения токов в открытом и закрытом состоянии.

Ключевые слова: печатная электроника; электрические характеристики; полевые транзисторы.

Сведения об авторах:

Тельминов Олег Александрович, кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр.1, e-mail: otelminov@niime.ru;

Воронова Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: navoronova@niime.ru;

Янович Сергей Игоревич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр.1, e-mail: syanovich@niime.ru;

Винник Денис Александрович, доктор химических наук, профессор, профессор РАН, Московский физико-технический институт, 141700, Московской обл., Долгопрудный, Институтский пер, д. 9, e-mail: vinnik.da@mipt.ru;

Чернуха Александр Сергеевич, кандидат химических наук, Московский физико-технический институт, 141700 Московской обл., Долгопрудный, Институтский пер, д. 9, e-mail: chernukha.as@mipt.ru

**LINE EDGE ROUGHNESS GENERATED IN CHEMICALLY
AMPLIFIED PHOTORESIST**

The review examines the chemical and physico-chemical phenomena leading to the appearance of line edge roughness of nanoscale topological structures formed by photoresists with chemical amplification, as well as various technological techniques that allow reducing the roughness value and increase the resolution.

Keywords: photoresist, chemical amplification, line edge roughness.

Data of author:

Kuznetsova Nina A., Doctor of Sciences in Organic and Physical Chemistry.

JSC "Organic Intermediates and Dyes Institute", 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Lihachevsky passage, 7, e-mail: nakuznetsova@niopik.ru

**EXAMINATION OF TRANSISTOR CHARACTERISTICS DERIVED THROUGH
PRINTED TECHNOLOGIES**

The article discusses the prospects for the development of printed electronics in the manufacture of active elements, namely field-effect transistors, using inkjet and aerosol printing technologies with partial application of photolithography methods for the manufacture of higher-resolution structural elements. A comparative analysis of the achieved world-class results has been carried out to obtain estimated characteristics of the devices under consideration, in particular, the speed of charge carriers and the ratio of currents in the open and closed state.

Keywords: printed electronics; electrical characteristics; field effect transistors.

Data of authors:

Telminov Oleg Aleksandrovich, Ph.D. in Technology, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Akademika Valiev Street, 6/1, 124460, Zelenograd, Russia, Moscow, e-mail: otelminov@niime.ru;

Voronova Natalia Vladimirovna, Ph.D in Physics and Mathematics «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, Akademika Valiev Street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: navoronova@niime.ru;

Yanovich Sergey Igorevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Academician Valiev Street, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: syanovich@niime.ru;

Vinnik Denis Alexandrovich, Dr. Sc. in Chemistry, Moscow Institute of Physics and Technology "MIPT (National Research University)", 141700, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky per., 9, e-mail: vinnik.da@mipt.ru;

Chernukha Aleksander Sergeevich, Ph.D in Chemistry, Moscow Institute of Physics and Technology "MIPT (National Research University)", 141700, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky per., 9, e-mail: chernukha.as@mipt.ru

ФУНКЦИЯ ГРИНА И Т-ОПЕРАТОР РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧАХ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАЗМОННЫХ И СПИНОВЫХ ВОЛН В ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ

Развита техника функции Грина и аналога квантово-механического Т-оператора рассеяния для изучения распространения плазмонных и спиновых волн в открытых (свободное пространство) и закрытых (волноводы) диэлектрических (металлических) и магнитных наноструктурах. Техника основывается на оригинальном интегральном уравнении Липпманна-Швингера для тензорного Т-оператора рассеяния диэлектрической или магнитной частицы с эффективным рассеивающим потенциалом, содержащим сосредоточенную на поверхности частицы часть, и правиле Ватсона композиции Т-операторов рассеяния ансамбля частиц. Приведён простой способ решения уравнения Липпманна-Швингера в квази-сепарабельной форме и показано, что полученное решение удовлетворяет оптической теореме в свободном пространстве.

Ключевые слова: Рассеяние, плазмонная волна, спиновая волна, теория Ми, оптическая теорема.

Сведения об авторе:

Барabanenkov Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 6, e-mail: barab@iptm.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ И КУБИЧЕСКОЙ ФАЗ РУТЕНИЯ В КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Рутений является перспективным материалом для применения в микроэлектронике в качестве диффузионного барьерного слоя, предотвращающего диффузию меди, или в качестве полноценной замены меди как основного проводника в системе металлизации. Доминирующей фазой объёмного рутения, широко изученного и описанного в литературе, является гексагональная решётка, в то время как менее стабильному гранецентрированному кубическому рутению посвящено всего несколько работ, и многие его свойства остаются неизвестными. В данной работе представлены результаты расчёта из первых принципов термодинамических свойств гексагональной и кубической фаз рутения с использованием квазигармонического приближения, позволяющего получить температурные зависимости параметров твёрдого тела с учётом теплового расширения кристаллической решётки.

Ключевые слова: термодинамические свойства, рутений, теория функционала плотности, квазигармоническое приближение.

Сведения об авторах:

Горохов Сергей Александрович, Научно-образовательный центр «Технологический центр», МФТИ; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева 6/1, e-mail: sgorohov@niime.ru;
Резник Александр Анатольевич, Московский Физико-Технический Институт; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева 6/1; e-mail: alreznik@niime.ru;
Резванов Аскар Анварович, кандидат физико-математических наук, Российский Технологический Университет «МИРЭА»; Научно-образовательный центр «Технологический центр», МФТИ; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева 6/1; e-mail: arezvanov@niime.ru

GREEN'S FUNCTION AND T-SCATTERING OPERATOR IN PLASMONIC AND SPIN WAVE PROPAGATION PROBLEMS IN OPEN AND CLOSED DIELECTRIC AND MAGNETIC STRUCTURES

Green function and quantum mechanical type T-scattering operator technique is developed to study plasmonic and spin wave propagation in open (free space) and confined (waveguides) dielectric (metallic) and magnetic nanostructures. The technique is based on the original Lippmann-Schwinger integral equation for the tensor T-scattering operator of a dielectric or magnetic particle with an effective scattering potential containing the scattering part centred on the particle surface, and Watson's rule for the composition of T-scattering operators of an ensemble of particles. A simple method for solving the Lippmann-Schwinger equation in quasi-separable form is given and it is shown that the resulting solution satisfies the optical theorem in free space.

Keywords: Scattering, plasmon wave, spin wave, Mie theory, optical theorem.

Data of author:

Barabanenkov Mikhail Yurievich, Institute of microelectronics technology and high purity materials RAS, 6, Academician Ossipyan str, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia, e-mail: barab@iptm.ru

ENERGY BARRIERS OF POINT DEFECTS MIGRATION IN TIN FROM FIRST PRINCIPLES

Ruthenium is a promising material for use in microelectronics, either as a diffusion barrier layer that prevents copper diffusion, or as a complete replacement for copper in a metallization system. Its hexagonal lattice structure has been widely studied in the literature, but there is still limited information available on the less stable face centered cubic phase. This paper presents the results of first-principles calculations on the thermodynamic properties of hexagonal and cubic phases of ruthenium using a quasi-harmonic approximation. These calculations allow us to obtain temperature-dependent thermodynamic solid body properties that take into account the thermal expansion of the crystal lattice.

Keywords: thermodynamic properties, ruthenium, density functional theory, quasi-harmonic approximation.

Data of authors:

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

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

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

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.
Подписано в печать 00.00.2025.
Дата выхода в свет 00.00.2025.

Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
(Типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Заказ № 0000
Тираж 300 экз. Цена договорная.

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

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
E-mail: info@naukapublishers.ru
<https://naukapublishers.ru>
<https://naukabooks.ru>