

Юбилейный Российский форум «Микроэлектроника 2024»

С 23 по 28 сентября 2024 г. на федеральной территории «Сириус» (г. Сочи) пройдет ключевое информационное событие года в сфере электронных технологий – *юбилейный Российский форум «Микроэлектроника 2024»*.

Председатель Программного комитета – **Г. Я. Красников**, академик РАН, президент РАН, научный руководитель АО «НИИМЭ», руководитель приоритетного технологического направления «Электронные технологии» РФ.

Организаторы: АО «НИИМЭ» и АО «НИИМА «Прогресс» при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, Министерства науки и образования РФ, группа компаний «Элемент».

Генеральный партнер: Фонд перспективных исследований.

Инновационный партнер: АО «ОКБ «Астрон».

Спортивный партнер: АО «Микрон».

Партнеры: ООО «НПП «Итэлма», ООО «Остек-ЭК», АО «НИИ ТМ», Консорциум «Доверенные и экстремальные электронные системы» (НИЯУ МИФИ – АО «ЭНПО СПЭЛС»).

Генеральный информационный партнер: АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА».

Оператор: агентство деловых коммуникаций «ПрофКонференции».

Программа Форума:

- Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули» (пройдет 26–27 сентября 2024 г. в Университете «Сириус»), включающая в себя двухдневные пленарные заседания, 13 научно-технических тематических секций, трек обзорно-дискуссионных заседаний на тему «Доверенные ПАК и ЭКБ для критической гражданской инфраструктуры»;

- деловая программа – открытые и закрытые заседания, бизнес-завтраки, презентации, стендовые доклады, зоны делового общения, пресс-конференции и брифинги, 20+ круглых столов по актуальным вопросам развития экономики данных в России, формирования нормативно-правовой базы, разработки ЭКБ, развития производственных мощностей и выпуска готовой продукции с участием ответственных сотрудников федеральных органов исполнительной власти, институтов развития, представителей промышленности, бизнеса, банков, науки и вузов;

- две предконференции (пройдут 9–12 сентября 2024 г. в г. Москве на базе НИЯУ МИФИ и 19–20 сентября 2024 г. в г. Зеленограде на базе НИУ МИЭТ), на которых будут представлены доклады на темы, связанные с созданием доверенных и экстремальных электронных систем, информационно-управляющих радиотехнических систем, ЭКБ, специального технологического оборудования, материалов, а также с другими актуальными направлениями развития научно-технического потенциала отрасли;

- выставка (пройдет 24–28 сентября 2024 г. в Парке науки и искусства «Сириус»), на которой представят научно-технические новинки более 150 организаций;

- 6-я Школа молодых ученых (пройдет 16–25 сентября 2024 г. в Парке науки и искусства «Сириус») – уникальная коммуникационная среда для 500 начинающих и состоявшихся специалистов микроэлектроники. Программа Школы включает в себя 10 тематических секций по различным отраслевым научным направлениям;

- программа «Микроэлектроника детям», состоящая из образовательных и культурно-развлекательных мероприятий для детей (различных возрастов) участников Форума.

Актуальную информацию можно получить на официальном сайте Форума microelectronica.pro



ISSN 1561-5405 (print), 2587-9960 (online)
DOI: 10.24151/1561-5405



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 29, № 4, 2024

июль – август

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

Учредитель и издатель: Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Главный редактор: Чаплыгин Юрий Александрович – академик РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X

Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878

Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136

Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603

Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482

Газарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175

Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471

Горбачев Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X

Громов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4563-9831

Душкин Александр Викторович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971

Коноплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X

Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293

Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455

Лабунцов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881

Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синописис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860

Меищеряков Роман Валерьевич – д.т.н., проф., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1129-8434

Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© «Известия вузов. Электроника», 2024

© МИЭТ, 2024

Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0002-5834-5138

Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786

Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977

Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254

Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0002-5589-7068

Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186

Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орёл, Россия),
ORCID: 0000-0001-7433-4140

Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X

Тимошенко Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0001-5411-1804

Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0001-9074-385X

Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания),
ORCID: 0000-0002-1433-260X

Заведующая редакцией **И. М. Доронина**

Редактор **А. В. Тихонова**

Корректор **И. В. Проскурякова**

Верстка **А. Ю. Рыжков, С. Ю. Рыжков**

Адрес редакции: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.

Тел.: 8-499-734-6205, e-mail: magazine@miee.ru, сайт: <http://ivuz-e.ru>

Адрес издателя: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.

Адрес полиграфического предприятия: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.

Подписано в печать 12.08.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.

Объем 17,205 усл.печ.л., 15,316 уч.-изд.л. Тираж 140 экз. Заказ № 14. Свободная цена.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

Журнал включен ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим специальностям:

1.3.5. Физическая электроника (технические науки, физико-математические науки)

1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки, физико-математические науки)

1.3.11. Физика полупроводников (технические науки, физико-математические науки)

1.3.12. Физика магнитных явлений (технические науки, физико-математические науки)

2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств (технические науки, физико-математические науки)

2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки)

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, в Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index. Является членом Crossref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934.

Подписной индекс в каталоге «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» – 47570.

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

- Григорьева Т. В., Голубков С. А., Бойко А. Н.* Исследование $p-i-n$ -диодных структур на высокоомных кремниевых подложках методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней..... 411

Материалы электроники

- Хамдохов З. М., Маргушев З. Ч., Калажиков З. Х., Калажиков Х. Х., Куишов Х. Б., Тешев Р. Ш.* Особенности воздействия пучка ионов гелия на пленку интеркалированного графита 420

Технологические процессы и маршруты

- Ширяев Б. В., Аргунов Д. П., Жидик Ю. С., Ющенко А. Ю., Лаптев И. В.* Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния 432
- Некрасов Н. П., Мурашко Д. Т., Василевский П. Н., Герасименко А. Ю., Неволин В. К., Бобринецкий И. И.* Лазерное формирование подвешенных графеновых каналов фоточувствительных детекторов 447
- Харламов Н. Р., Рябышенков А. С., Каракеев В. И.* Применение интегральных показателей при оценке уровня экологической безопасности наукоёмкой природно-технической геосистемы 456

Элементы интегральной электроники

- Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В.* Пространственные характеристики кремниевых фотоумножителей..... 466
- Мефтахутдинов Р. М.* Моделирование транзистора с плавающим затвором на основе вандер-ваальсового гетероперехода графен/h-BN/MoS₂ 478
- Максименко Ю. Н., Петросянец К. О., Силкин Д. С., Грабежова В. К.* TCAD-моделирование транзистора со статической индукцией..... 489

Схемотехника и проектирование

- Волобуев П. С., Кориунов А. В., Семенов А. Н.* Интегральный регулятор напряжения, стабильный к шумам по цепям питания..... 504
- Шумарин С. В., Фролова Т. Н.* Модификация SPICE-моделей КМОП-микросхем для имитации частотного отклика кольцевого генератора на низкоинтенсивное ионизирующее облучение 514

Интегральные радиоэлектронные устройства

- Маслаков М. П., Лыков О. В.* Разработка устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения 525

Информационно-коммуникационные технологии

- Бордюжа В., Брейкина К. В., Умняшкин С. В.* Автоматизация определения числа итераций в задаче восстановления смазанных изображений методом Люси – Ричардсона..... 539

Конференции

- Юбилейный Российский форум «Микроэлектроника 2024» 2-я стр. обложки
- К сведению авторов 551

ISSN 1561-5405 (print), 2587-9960 (online)
DOI: 10.24151/1561-5405



Proceedings of Universities. ELECTRONICS

Volume 29, No. 4, 2024
July – August

The scientific and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

Founder and Publisher: *National Research University of Electronic Technology*

Editor-in-Chief: *Yury A. Chaplygin* – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Editorial Board:

Sergey A. Gavrillov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X

Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878

Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136

Vladimir A. Bespalov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-8015-7603

Alexandr V. Dushkin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-8078-8971

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7591-9175

Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Physics of the NAS of Belarus (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471

Sergey V. Gavrillov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482

Aleksandr A. Gorbatsevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X

Dmitry G. Gromov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-4563-9831

Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-9074-385X

Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X

Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293

Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., President of RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2441-7455

Vladimir A. Labunov – Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0002-3494-4881

Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company “Synopsys Armenia” (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860

© “Proceedings of Universities. Electronics”, 2024
© MIET, 2024

Roman V. Meshcheryakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1129-8434
Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377
Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)
Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Orel State University named after I. S. Turgenev (Orel, Russia), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vyacheslav V. Svetukhin – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMC “Technological Centre” (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Head of editorial staff *Doronina I. M.*

Chief editors *Tikhonova A. V., Proskuryakova I. V.*

Make-up *Ryzhkov S. Yu., Ryzhkov A. Yu.*

Editorial Board’s address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET, editorial office of the Journal “Proceedings of Universities. Electronics”.

Tel.: +7-499-734-62-05, **e-mail:** magazine@miee.ru, **website:** http://ivuz-e.ru

Publisher’s and printery addresses: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET.

Signed to print 12.08.2024. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 17,205. Number of copies 140. Order no. 14. Free price.

The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

The journal is included into the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of thesis for candidate of science and doctor degrees must be published for the following specialties:

- 1.3.5. Physical electronics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
- 1.3.8. Condensed matter physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
- 1.3.11. Semiconductor physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
- 1.3.12. Physics of magnetic phenomena (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
- 2.2.1. Vacuum and plasma electronics (Engineering Sciences)
- 2.2.2. Electronic component base of micro- and nanoelectronics, quantum devices (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
- 2.2.3. Technology and equipment for electronic materials and devices production (Engineering Sciences)
- 2.2.8. Material, product, substance and natural environment control and diagnostic techniques and devices (Engineering Sciences)
- 2.3.1. System analysis, information handling and processing (Engineering Sciences)
- 2.3.3. Process industries automation and control (Engineering Sciences)
- 2.3.5. Mathware and software for computer systems, complexes and networks (Engineering Sciences)

The journal is included into the Russian Science Citation Index on the Web of Science basis, into the Russian index of scientific citing and into the Rating Science Index. Is the member of Crossref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue “Russian Press” LLC “Agency “Book-Service” – 38934.

The subscription index in catalogue “Periodicals. Newspapers and magazines” LLC “Ural-Press Okrug” – 47570.

CONTENTS

Fundamental researches

- Grigoreva T. V., Golubkov S. A., Boiko A. N.* Research into $p-i-n$ diode structures on high-resistivity silicon substrates using deep-level transient spectroscopy 411

Electronics materials

- Khamdokhov Z. M., Margushev Z. Ch., Kalazhokov Z. Kh., Kalazhokov Kh. Kh., Kushkhov Kh. B., Teshev R. Sh.* Features of the effect of a helium ion beam on an intercalated graphite film 420

Technological processes and routes

- Shiryaev B. V., Argunov D. P., Zhidik Yu. S., Yushchenko A. Yu., Laptev I. V.* Algorithm for automatic inspection of the surface of integrated circuits based on calculation of pixel distance 432
- Nekrasov N. P., Murashko D. T., Vasilevsky P. N., Gerasimenko A. Yu., Nevolin V. K., Bobrinetskiy I. I.* Laser formation of suspended graphene channels for photosensitive detectors 447
- Kharlamov N. R., Riabyshnikov A. S., Karakeyan V. I.* Application of integrated indices in making an assessment of high-tech natural-engineering geosystem environmental safety level 456

Integrated electronics elements

- Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V.* Spatial properties of silicon photomultipliers 466
- Meftakhutdinov R. M.* Simulation of a floating gate transistor based on a graphene/h-BN/MoS₂ van der Waals heterojunction 478
- Maksimenco Yu. N., Petrosyants K. O., Silkin D. S., Grabezova V. K.* TCAD simulation of a static induction transistor 489

Circuit engineering and design

- Volobuev P. S., Korshunov A. V., Semenov A. N.* Integrated voltage regulator with improved stability to noise in supply networks 504
- Shumarin S. V., Frolova T. N.* Modification of SPICE models of CMOS microcircuits to simulate the frequency response of a ring oscillator to low-intensity ionizing radiation 514

Integrated radioelectronic devices

- Maslov M. P., Lykov O. V.* Development of a device for obtaining high-quality sinusoidal alternating voltage 525

Information-communication technologies

- Bordiuzha V., Breykina K. V., Umnyashkin S. V.* Automation of determining the number of iterations in the problem of blurred images restoration by the Lucy – Richardson method 539

Conferences

- Jubilee Russian Forum “Microelectronics 2024” 2nd cover page
- Instruction for authors 551