



КЭЛТ-23

Вторая объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (13–16 ноября 2023 г., г. Черноголовка)

ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук» (ИПТМ РАН), г. Черноголовка, и АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), г. Москва, г. Зеленоград, проводят **13–16 ноября 2023 г. Вторую объединенную конференцию «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике».**

Место проведения: Россия, Московская обл., Ногинский район, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6, ИПТМ РАН.

Научная программа конференции предусматривает следующие секции:

- Диагностика полупроводниковых материалов и структур.
- Характеризация материалов и структур методами ПЭМ и РЭМ.
- Сканирующая зондовая микроскопия и зондовая нанолитография.
- Электронно-лучевая и ионная литографии.
- Электронно-лучевые технологии в микроэлектронике.
- Рентгеновская кристаллооптика.
- Многослойная оптика для рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазона.
- Применение рентгеновской оптики для исследования микро- и наноструктур.
- Рентгеновская микроскопия и томография.
- Новые методы исследования микро- и наноструктур с использованием синхротронных и лабораторных источников рентгеновского излучения.

Форма участия: конференция будет проводиться в конференц-зале ИПТМ РАН в очном режиме. Участники с устными докладами, у которых не будет возможности присутствовать лично, смогут представить доклад в режиме видеоконференции. **Ссылки на видеоконференции в Zoom будут размещены на главной странице сайта.** Для стендовых докладов онлайн-режим не предусмотрен.

Подробная информация размещена на сайте: <https://cebt23.iptm.ru/>

Секретариат:

Казьмирук Лидия Александровна
Тел.: +7 (496 52) 4 42 19

Осипова Галина Юрьевна
Тел.: +7 (496 52) 4 42 53

Факс: +7 (496 52) 4 41 68
E-mail: cebt23@iptm.ru



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 28, № 5, 2023

сентябрь – октябрь

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

Гагарина 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., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (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

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

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

Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)

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

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

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

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

Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада),
ORCID: 0000-0003-0974-1262

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, <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 06.10.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
 Объем 18,135 усл.печ.л., 16,052 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 25. 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

Технологические процессы и маршруты

- Подорожний О. В., Румянцев А. В., Волков Р. Л., Боргардт Н. И.* Моделирование процессов распыления материала и имплантации галлия при воздействии фокусированного ионного пучка на кремниевую подложку 555

Элементы интегральной электроники

- Дюжнев Н. А., Евсиков И. Д.* Вакуумная нанoeлектроника на основе полупроводниковых автоэмиссионных структур: текущее состояние и перспективы развития. Обзор 569
- Смирнов В. И., Гавриков А. А.* Исследование теплоэлектрических свойств мощных MOSFET-транзисторов 600

Схемотехника и проектирование

- Melikyan V. Sh., Vardumyan A. V., Harutyunyan A. G., Asatryan N. A., Melikyan Sh. V., Karapetyan E. Y.* System for automated IC design based on generative adversarial and artificial deep neural networks
(*Меликян В. Ш., Вардунян А. В., Арутюнян А. Г., Асатрян Н. А., Меликян Ш. В., Карапетян Э. Е.* Система автоматизированного проектирования ИС, основанная на генеративно-сопоставительной и искусственной глубокой нейронных сетях) 612
- Лагунович Н. Л.* Двумерное моделирование эмиттерного $p-n^+$ -перехода кремниевого $n-p-n$ -транзистора в прямоугольной и цилиндрической системах координат 621
- Дворников О. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н., Чумаков В. Е.* Входные каскады программируемых быстродействующих операционных усилителей на основе базового матричного кристалла МН2ХА031 629

Микро- и наносистемная техника

- Тимошенко С. П., Тимошенко А. С., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Дернов И. С., Мусаткин А. С., Лебедев А. А.* Исследование влияния степени вакуумирования на добротность колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика 642

Интегральные радиоэлектронные устройства

- Курчанов А. Ф., Слюсарев С. Н., Овчинников С. Н., Сальников А. С.* Миниатюрный стандарт частоты на основе КПП в Cs 649

Информационно-коммуникационные технологии

- Макаров А. И., Мунерман В. И.* Использование $(0, \mu)$ -свернутого произведения многомерных матриц для решения задач теории графов 659
- Ефанов Д. В., Погодина Т. С.* Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. I. Структуры на основе дублирования и метода логической коррекции сигналов 670
- Гагарина Л. Г., Букарев А. В.* Метод автоматизированного тестирования устройств потребительской электроники с помощью удаленного вызова процедур и облачных сервисов 687

Юбилей

- Беспалову Владимиру Александровичу – 65 лет 700
- Селищеву Сергею Васильевичу – 70 лет 701
- Сидоренко Анатолию Сергеевичу – 70 лет 702

Конференции

- Вторая объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (13–16 ноября 2023 г., г. Черноголовка) 2-я стр. обложки
- К сведению авторов 703



**Proceedings of Universities.
ELECTRONICS**

**Volume 28, No. 5, 2023
September – October**

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. Gavrilov – 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., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471

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

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

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

Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Optolink LLC (Moscow, Russia)

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”, 2023
© MIET, 2023

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

Andrey Y. Sazonov – PhD, Prof., University of Waterloo (Canada),
ORCID: 0000-0003-0974-1262

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@miec.ru, **http://ivuz-e.ru**

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

Signed to print 06.10.2023. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 18,135. Number of copies 130. Order no. 25. 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

Technological processes and routes

- Podorozhniy O. V., Rumyantsev A. V., Volkov R. L., Borgardt N. I.* Simulation of material sputtering and gallium implantation during focused ion beam irradiation of silicon substrate 555

Integrated electronics elements

- Djuzhev N. A., Eysikov I. D.* Vacuum nanoelectronics based on semiconductor field emission structures: current state and development prospects. Review 569
- Smirnov V. I., Gavrikov A. A.* Study of the thermoelectric properties of powerful MOSFETs 600

Circuit engineering and design

- Melikyan V. Sh., Vardumyan A. V., Harutyunyan A. G., Asatryan N. A., Melikyan Sh. V., Karapetyan E. Y.* System for automated IC design based on generative adversarial and artificial deep neural networks..... 612
- Lagunovich N. L.* Two-dimensional simulation of emitter $p-n^+$ junction of a silicon $n-p-n$ transistor in rectangular and cylindrical coordinate systems..... 621
- Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N., Chumakov V. E.* Input stages of programmable high-speed operational amplifiers based on the master slice array MH2XA031 629

Micro- and nanosystem technology

- Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S., Anchutin S. A., Kochurina E. S., Dernov I. S., Musatkin A. S., Lebedev A. A.* Investigating the influence of vacuum degree on merit factor of oscillating circuit of MEMS sensor sensitive element..... 642

Integrated radioelectronic devices

- Kurchanov A. F., Slyusarev S. N., Ovchinnikov S. N., Salnikov A. S.* Miniature frequency standard based on CPT in Cs 649

Information-communication technologies

- Makarov A. I., Munerman V. I.* Application of $(0, \mu)$ convoluted product of multidimensional matrices for graph theory problems solving 659
- Efanov D. V., Pogodina T. S.* Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code. I. Structures based on duplication and the Boolean signals correction method 670
- Gagarina L. G., Bukarev A. V.* A method for automated testing of consumer electronics devices using remote procedure calls and cloud services 687

Anniversaries

- Bespalov Vladimir Aleksandrovich is 65 years old 700
- Selishchev Sergey Vasilievich is 70 years old..... 701
- Sidorenko Anatolie Sergeevich is 70 years old 702

Conferences

- Second Joint Conference "Electron-Beam Technologies and X-Ray Optics in Microelectronics" (November 13 to 16, 2023, Chernogolovka town) 2nd cover page
- Instructions for authors 703