



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 28, № 6, 2023

ноябрь – декабрь

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., 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

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

Конюгов 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, **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 07.12.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
 Объем 18,135 усл.печ.л., 15,552 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 26. 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

- Волков Р. Л., Боргардт Н. И.* Идентификация структуры наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций методами просвечивающей электронной микроскопии 711

Материалы электроники

- Аишхотов О. Г., Аишхотова И. Б., Магкоев Т. Т.* Резистивные свойства конструкционных стекол микроканальных пластин 727
- Горошко Д. Л., Гаврилин И. М., Дронов А. А., Горошко О. А., Волкова Л. С., Гревцов Н. Л., Чубенко Е. Б., Бондаренко В. П.* Электрический транспорт в пористых структурах Si-Ge/c-Si, сформированных электрохимическим осаждением германия в пористый кремний 734
- Громов Д. Г., Гаврилов С. А., Лебедев Е. А., Силибин М. В., Дубков С. В., Аникин А. В., Погалов А. И., Дронова Д. А., Бутманов Д. Д., Ширяев М. Е., Громов В. Д., Рязанов Р. М., Шарипов Р. А., Беспалов В. А.* Управление составом тонких пленок Mo-Si-N-O при реактивном магнетронном распылении 745

Технологические процессы и маршруты

- Голишников А. А., Дюжнев Н. А., Парамонов В. В., Потапенко И. В., Путря М. Г., Сомов Н. М., Чаплыгин Ю. А.* Исследование и разработка процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния со сниженной шероховатостью боковых стенок структур 762
- Корчагин Е. П., Нагreshников Е. В., Штерн М. Ю., Рогачев М. С., Мустафоев Б. Р., Штерн Ю. И.* Исследования факторов, влияющих на сопротивление контактов в термоэлементах 773

Схемотехника и проектирование

- Соболев В. А., Лосев В. В.* Разработка RTL-модели генератора псевдослучайных чисел на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью в каскаде Голлмана 784
- Крупкина Т. Ю., Лосев В. В., Беневоленский С. Б., Хлыбов А. И., Родионов Д. В.* Влияние потерь в соединениях при измерении коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра 794
- Раков А. В., Шевицов И. В., Борин О. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В.* Методика оценки S-параметров высокоскоростных путей передачи сигналов в корпусах микросхем 802
- Раннев Н. Ю., Кондратенко С. В., Дубинский А. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В.* Высокоскоростной перестраиваемый КМОП-усилитель-ограничитель для приемника сигнала оптической линии 814
- Петросяни К. О., Силкин Д. С., Попов Д. А., Исмаил-Заде М. Р., Харитонов И. А., Переверзев Л. Е., Морозов А. А., Турганев П. В.* Особенности TCAD- и SPICE-моделирования удара заряженной частицы в 6Т-ячейку статической памяти, изготовленную по КМОП-технологии с проектными нормами 28 нм 826

Информационно-коммуникационные технологии

- Ефанов Д. В., Погодина Т. С.* Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. II. Моделирование работы цифровых устройств при неисправностях... 838
- Тематический указатель статей, опубликованных в 2023 году 854
- К сведению авторов 859



**Proceedings of Universities.
ELECTRONICS**

**Volume 28, No. 6, 2023
November – December**

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., Institute of Physics of the NAS of Belarus (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. Gorbatsevich – 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, **website:** http://ivuz-e.ru

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

Signed to print 07.12.2023. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 18,135. Number of copies 130. Order no. 26. 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

- Volkov R. L., Borgardt N. I.* Multilayered nanoscale heterocompositions structure study using transmission electron microscopy 711

Electronics materials

- Ashkhotov O. G., Ashkhotova I. B., Magkoev T. T.* Resistive properties of structural glasses of microchannel plates 727
- Goroshko D. L., Gavrilin I. M., Dronov A. A., Goroshko O. A., Volkova L. S., Grevtsov N. L., Chubenko E. B., Bondarenko V. P.* Electrical transport in porous Si-Ge/c-Si structures formed by electrochemical deposition of germanium into porous silicon 734
- Gromov D. G., Gavrilov S. A., Lebedev E. A., Silibin M. V., Dubkov S. V., Anikin A. V., Pogalov A. I., Dronova D. A., Butmanov D. D., Shiryayev M. E., Gromov V. D., Ryazanov R. M., Sharipov R. A., Bepalov V. A.* Composition control of Mo-Si-N-O thin films during reactive magnetron sputtering..... 745

Technological processes and routes

- Golishnikov A. A., Dyuzhev N. A., Paramonov V. V., Potapenko I. V., Putrya M. G., Somov N. M., Chaplygin Yu. A.* Research and development of the deep anisotropic silicon plasma etching process with reduced sidewall roughness of the structures 762
- Korchagin E. P., Nagreshnikov E. V., Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Mustafafoev B. R., Shtern Yu. I.* Research of factors impacting contact resistance in thermoelements 773

Circuit engineering and design

- Sobolev V. A., Losev V. V.* Development of an RTL model of a pseudorandom number generator based on nonlinear feedback shift registers in a Gollmann cascade 784
- Krupkina T. Yu., Losev V. V., Benevolenskiy S. B., Khlybov A. I., Rodionov D. V.* Influence of cable loss on gain and noise figure measured using spectrum analyzer 794
- Rakov A. V., Shevtsov I. V., Borin O. V., Gorshkova N. M., Skok D. V.* Methodology for estimating S-parameters of high-speed signal transmission paths in chip packages 802
- Rannev N. Yu., Kondratenko S. V., Dubinsky A. V., Gorshkova N. M., Skok D. V.* High-speed tunable CMOS limiter amplifier for optical line signal receiver 814
- Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A., Ismail-Zade M. R., Kharitonov I. A., Pereverzev L. E., Morozov A. A., Turgenev P. V.* Features of TCAD and SPICE simulation of a charged particle impact into a 6T SRAM cell manufactured using CMOS 28nm technology node..... 826

Information-communication technologies

- Efanov D. V., Pogodina T. S.* Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code. II. Modeling the operation of digital devices in case of faults 838
- Thematic index of articles published in 2023..... 854
- Instructions for authors 859