



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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 28

Vol. 28

№ 5

No. 5

сентябрь – октябрь | September – October

2023



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 Рейтинги 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., Evsikov 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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 537.534.35
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-5-555-568
EDN: ZCQJUF

Моделирование процессов распыления материала и имплантации галлия при воздействии фокусированного ионного пучка на кремниевую подложку

О. В. Подорожний, А. В. Румянцев, Р. Л. Волков, Н. И. Боргардт

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва,
Россия*

borgardt@miee.ru

Аннотация. Выявление закономерностей взаимодействия ускоренных ионов с облучаемым материалом на основе моделирования методом Монте-Карло способствует эффективному применению метода фокусированного ионного пучка в современных нанотехнологиях. Корректность результатов вычислений зависит от модели и параметров, определяющих поверхностную энергию связи распыляемых атомов. В работе для нахождения поверхностной энергии связи использована дискретно-непрерывная модель, позволяющая учитывать образование преципитатов галлия при облучении кремниевой подложки ионами галлия. Для сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными распыления материала методом фокусированного ионного пучка приготовлены два типа прямоугольных углублений. Углубления первого типа сформированы при одинаковой дозе ионов пучка, близкой к $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и соответствующей стационарному режиму распыления, и при ускоряющих напряжениях 8, 16 и 30 кВ. Углубления второго типа сформированы при энергии ионов 30 кэВ и дозах $2,5 \cdot 10^{16}$; $5 \cdot 10^{16}$; $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Поперечные сечения углублений исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии. С помощью R -фактора проведено сравнение коэффициента распыления и профилей распределения атомов галлия по глубине, вычисленных в программном пакете SDTrimSP 5.07, с экспериментальными данными. Определены два набора значений для варьируемых величин: поверхностной энергии связи атомов галлия и параметра α_1 дискретно-непрерывной модели. Первый набор значений с приемлемой точностью описывает данные эксперимента при небольшом количестве имплантированных атомов галлия, что реализуется для малых доз ионов, а также при энергии пучка 8 кэВ и дозе $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Второй набор оптимален для описания взаимодействия ионного пучка с подложкой при энергиях ионов 16 и 30 кэВ в стационарном режиме распыления.

© О. В. Подорожний, А. В. Румянцев, Р. Л. Волков, Н. И. Боргардт, 2023

Ключевые слова: фокусированный ионный пучок, распыление, кремний, метод Монте-Карло

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФН (соглашение № 21-79-00197) с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов».

Для цитирования: 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 // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 555–568. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-555-568>. – EDN: ZCQJUF.

Original article

Simulation of material sputtering and gallium implantation during focused ion beam irradiation of silicon substrate

O. V. Podorozhnyi, A. V. Rumyantsev, R. L. Volkov, N. I. Borgardt

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

borgardt@miee.ru

Abstract. Revealing the regularities of the interaction of accelerated ions with the irradiated material based on the Monte Carlo simulation contributes to the efficient application of the focused ion beam technique in modern nanotechnologies. The correctness of the calculation results depends on the model and parameters determining the surface binding energy of the sputtered atoms. In this work, to find the surface binding energy a discrete-continuous model was used allowing the consideration of gallium precipitates formation upon irradiation of a silicon substrate with gallium ions. To compare the simulation results with the experimental data by the focused ion beam technique, two types of rectangular boxes were prepared. The structures of the first type were formed at the same dose close to $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, corresponding to the steady-state sputtering regime, and at accelerating voltages of 8, 16 and 30 kV. The structures of the second type were formed at an ion energy of 30 keV and doses of $2.5 \cdot 10^{16}$; $5 \cdot 10^{16}$; $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. The cross sections of the boxes were examined by transmission electron microscopy. The sputtering yield and depth distribution profiles of gallium atoms calculated in the SDTrimSP 5.07 software package were compared with the experimental data using the R factor. Two sets of values have been established for the variable parameters: the surface binding energy of gallium atoms and the a_1 parameter of the discrete-continuous model. The first set describes the experimental data with acceptable accuracy for a small number of implanted gallium atoms, which is realized for low doses of ions, as well as for beam energy of 8 keV and a dose of $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. The second set is optimal for description of ion beam interaction with substrate at ion energies of 16 and 30 keV in the steady sputtering regime.

Keywords: focused ion beam, sputtering, silicon, Monte Carlo simulation

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-79-00197) using the shared equipment of the Collective-Use Center “Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects”.

For citation: 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. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 555–568. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-555-568>. – EDN: ZCQJUF.

Введение. Разработка методов формирования микро- и наноструктур на основе кремния – важная задача исследований [1], направленных на развитие современных нанотехнологий. Подходы, основанные на распылении атомов образца пучками ускоренных ионов [2], находят широкое применение для наноструктурирования поверхности монокристаллического кремния. Одним из них является метод фокусированного ионного пучка, позволяющий локально и прецизионно распылять (удалять) материал с поверхности различных подложек для создания рельефа заданной формы. Например, с его помощью в кремнии изготовлены антиотражающие структуры [3], метаповерхности [4] и микролинзы [5].

Для эффективного использования метода фокусированного ионного пучка необходимы оптимизация параметров процесса распыления материала [6] и исследование взаимодействия ионов пучка с веществом образца [7], осуществляемое в том числе с применением компьютерного моделирования [8, 9]. Так, бомбардировка ионами галлия технологически важных материалов, включая бинарные соединения, изучена экспериментально и путем численных вычислений методом Монте-Карло [10–12] в динамическом режиме. Однако количественное совпадение результатов эксперимента и моделирования не всегда достигается даже для хорошо исследованного случая монокристаллического кремния. В работе [13] продемонстрировано удовлетворительное согласие экспериментально установленной и вычисленной концентрации имплантированного галлия при низких дозах ионов, но расчетные и экспериментальные значения коэффициента распыления заметно отличаются друг от друга. Существенное расхождение экспериментальных и расчетных профилей распределения имплантированного галлия выявлено в работах [14, 15]. В работе [16] рассмотрено воздействие ионов под разными углами падения и установлено удовлетворительное совпадение коэффициентов распыления, найденных на основе эксперимента и моделирования.

Возникающие во многих случаях существенные расхождения между результатами вычислений и экспериментальными данными обусловлены тем, что при моделировании методом Монте-Карло учитываются только перемещения атомов в каскаде столкновений и полностью игнорируются процессы, происходящие на более длительных временных промежутках, в частности зарождение и рост преципитатов [17]. Подобные процессы можно учесть, например, при моделировании методом молекулярной динамики, что ввиду большого объема численных расчетов требует значительных вычислительных ресурсов и является труднореализуемым в случае структур с реалистичными размерами, облучаемыми практически используемыми дозами ионов. Методом Монте-Карло можно также получать удовлетворительные результаты моделирования на основе обоснованного выбора значений поверхностных энергий связи (ПЭС) между атомами. Эти значения характеризуют процесс распыления образца при облучении ионным пучком и могут быть найдены на основе моделирования методами молекулярной динамики [18, 19] или рассматриваться как варьируемые (подгоночные) значения, определяемые при сравнении расчетных и экспериментальных данных [20, 21].

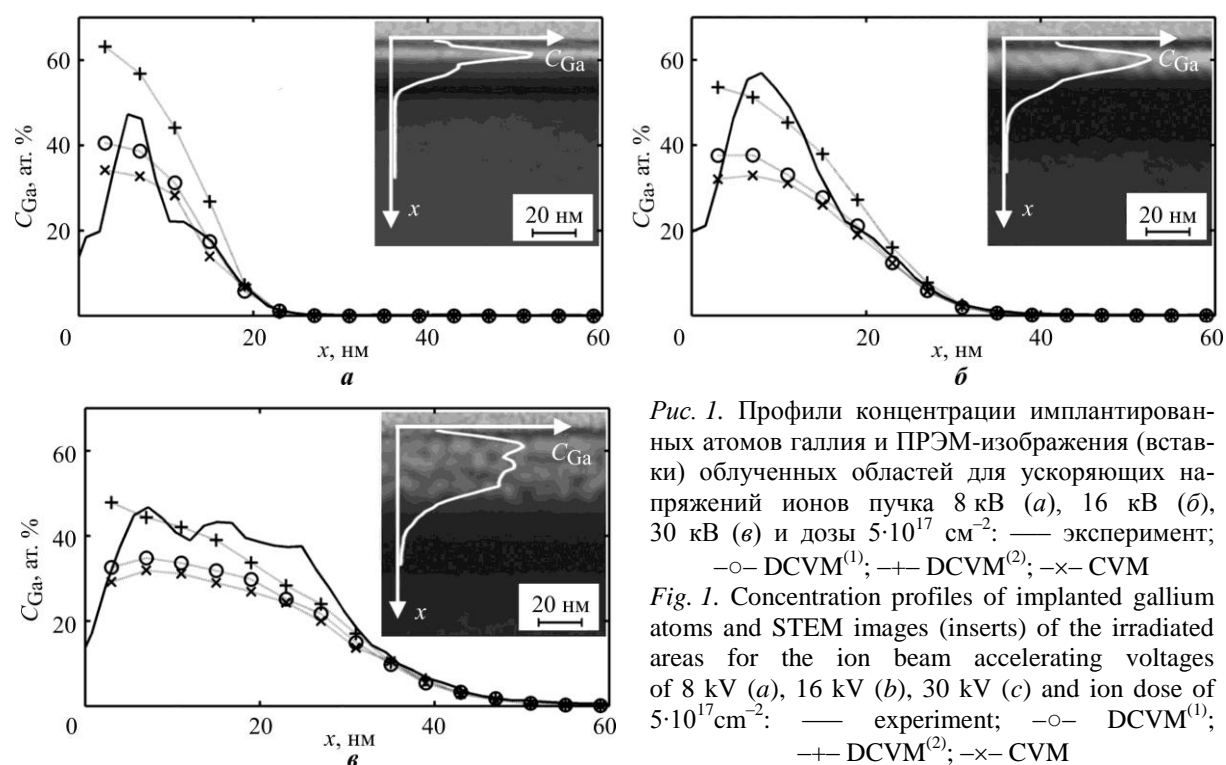
В настоящей работе для нахождения ПЭС атомов кремния и галлия используется дискретно-непрерывная модель. Значения ПЭС определяются на основе количественного сравнения расчетных профилей концентрации атомов галлия и коэффициентов распыления с экспериментальными данными, полученными методами просвечивающей

электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа на основе изучения поперечных сечений прямоугольных углублений, сформированных методом фокусированного ионного пучка при различных ускоряющих напряжениях.

Экспериментальные исследования тестовых структур. Бомбардировку монокристаллического кремния ионами галлия осуществляли в электронно-ионном микроскопе FEI Helios Nanolab 650. Образцы первого типа, описанные в работах [5, 6], представляли собой прямоугольные углубления размером $2,5 \times 1$ мкм, которые формировали при фиксированной дозе ионов, близкой к $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и соответствующей стационарному (установившемуся) режиму распыления, ускоряющих напряжениях 8, 16 и 30 кВ и токах 100, 250 и 400 пА соответственно. Образцы второго типа получали при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе пучка 230 пА путем облучения трех прямоугольных областей с размерами 1×5 мкм разными дозами ионов: $2,5 \cdot 10^{16}$, $5 \cdot 10^{16}$ и $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Из облученных областей методом *in situ lift-out* [22] готовили образцы поперечного сечения в виде тонкой фольги, которые исследовали методами просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа в электронном микроскопе Titan Themis 200 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

На рис. 1 и 2 представлены ПРЭМ-изображения приповерхностных областей исследованных образцов и профили концентрации галлия $C_{\text{Ga}}(x)$ вдоль оси x , направленной перпендикулярно к поверхности подложки. Для моделирования использованы дискретно-непрерывная модель (Discrete-Continuous Variation Model, DCVM) с двумя наборами значений параметров (DCVM⁽¹⁾ и DCVM⁽²⁾) и непрерывная модель (Continuous Variation Model, CVM). Аморфизованный при облучении слой *a*-Si и кристаллический кремний *c*-Si визуализируются на микрофотографиях как более темные и менее темные области соответственно, а обогащенные галлием участки образца – как светлые области. Профили $C_{\text{Ga}}(x)$ получали путем усреднения двумерных карт распределения атомов галлия в направлении, параллельном поверхности подложки.



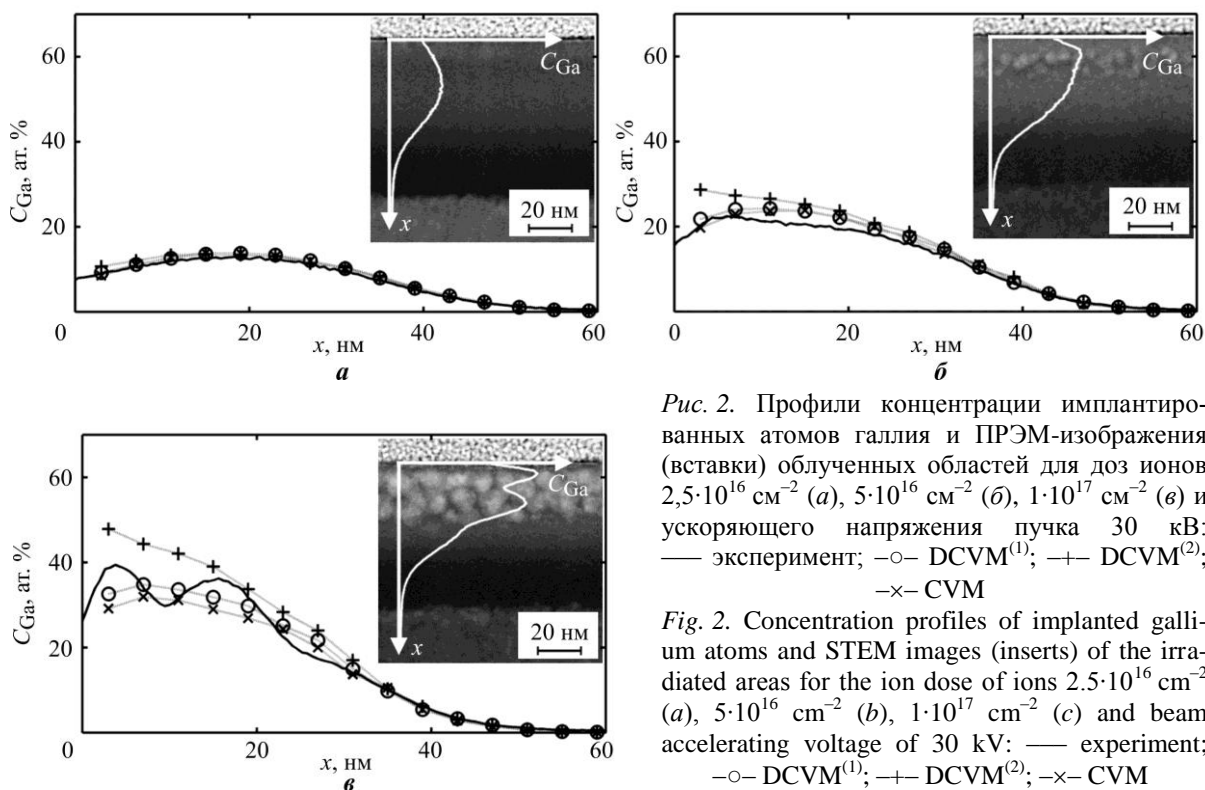


Рис. 2. Профили концентрации имплантированных атомов галлия и ПРЭМ-изображения (вставки) облученных областей для доз ионов $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (а), $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (б), $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (в) и ускоряющего напряжения пучка 30 кВ: — эксперимент; -○- DCVM⁽¹⁾; +- DCVM⁽²⁾; -x- CVM

Fig. 2. Concentration profiles of implanted gallium atoms and STEM images (inserts) of the irradiated areas for the ion dose of ions $2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (a), $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (b), $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (c) and beam accelerating voltage of 30 kV: — experiment; -○- DCVM⁽¹⁾; +- DCVM⁽²⁾; -x- CVM

Из рис. 1 видно, что в стационарном режиме распыления кремниевой подложки ионами галлия при ускоряющих напряжениях 8 и 16 кВ (рис. 1, а, б) имплантированный галлий образует тонкие сплошные слои, которым соответствует резкий пик на профилях $C_{\text{Ga}}(x)$. При повышении напряжения до 30 кВ ширина пика существенно увеличивается вследствие образования преципитатов атомов Ga, отчетливо выявляемых на ПРЭМ-изображении (рис. 1, в).

На рис. 2 проиллюстрировано изменение в распределении имплантированного галлия по мере увеличения дозы ионов при ускоряющем напряжении 30 кВ. При дозе ионов $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 2, а) галлий равномерно распределен в аморфизованном кремнии в латеральном направлении, профиль его концентрации вдоль оси x близок к теоретически ожидаемому гауссовому распределению. При дозе ионов $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 2, б) в приповерхностной области образца происходит образование преципитатов галлия. Из сравнения рис. 2, а и 2, б следует, что пик концентрации атомов галлия на рис. 2, б находится несколько ближе к поверхности, чем ожидаемая средняя глубина проникновения ионов в образец. При достижении дозы облучения $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ атомы галлия образуют в приповерхностной области два слоя наночастиц (рис. 2, в), что отчетливо выявляется на ПРЭМ-изображениях и профилях концентрации и соответствует литературным данным [23]. Дальнейшее увеличение дозы падающих ионов до $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводит к расширению слоя атомов галлия в аморфизованном кремнии с формированием третьего слоя наночастиц (см. рис. 1, в).

Моделирование методом Монте-Карло. Моделирование облучения кремниевой подложки ионами галлия выполняли методом Монте-Карло в программном пакете SDTrimSP 5.07 [24]. Вычисления проводили в динамическом режиме с учетом имплантации ионов в образец с использованием потенциала межатомного взаимодействия ZBL [25]. Дозы имплантированных ионов соответствовали экспериментальным значениям, при этом число траекторий не изменялось и составляло 30 000. Для доз ионов выше

$1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ коэффициент распыления атомов галлия равен единице, что свидетельствует о стационарном режиме процесса облучения. Для вычисления профилей концентрации атомов галлия $C_{\text{Ga}}(x)$ облученную область глубиной 200 нм разделяли на 50 равных по толщине слоев.

Для моделирования распыления кремниевой подложки падающим ионным пучком методом Монте-Карло необходимо определить ПЭС атомов кремния U_{Si} и галлия U_{Ga} . Из имеющихся в пакете SDTrimSP стандартных возможностей вычисления этих энергий целесообразно использовать CVM, в рамках которой U_{Si} и U_{Ga} находятся на основе соотношений

$$U_{\text{Si}} = C_{\text{Si}} U_{\text{Si-Si}} + C_{\text{Ga}} U_{\text{Si-Ga}}, \quad (1)$$

$$U_{\text{Ga}} = C_{\text{Si}} U_{\text{Ga-Si}} + C_{\text{Ga}} U_{\text{Ga-Ga}}, \quad (2)$$

где C_{Si} и C_{Ga} – концентрации атомов кремния и галлия; $U_{\text{Si-Si}} = 4,7 \text{ эВ}$ и $U_{\text{Ga-Ga}} = 2,8 \text{ эВ}$ – энергии связи, равные энергиям сублимации химически чистых кремния и галлия [25]; $U_{\text{Si-Ga}}$ и $U_{\text{Ga-Si}}$ – энергии связи атома кремния в окружении атомов галлия и наоборот, значения которых одинаковы и равны: $U_{\text{Si-Ga}} = U_{\text{Ga-Si}} = 2,8 \text{ эВ}$ [18].

Поскольку, согласно представленным экспериментальным данным, начиная с дозы падающих ионов, превышающей $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, имплантированные в кремний атомы галлия образуют преципитаты, для описания процесса распыления выражений (1) и (2) становится недостаточно. Поэтому в работах [14, 15] вместо CVM предложено использовать DCVM. В ней учитывается слабое взаимодействие между атомами кремния и галлия ($U_{\text{Si-Ga}} = U_{\text{Ga-Si}} \approx 0$) и принимается во внимание тот факт, что из-за образования преципитатов атомы Ga распыляются из них и, следовательно, должно выполняться равенство $U_{\text{Ga}} = U_{\text{Ga-Ga}}$, которое может быть получено формальным выбором $U_{\text{Ga-Ga}} = U_{\text{Ga-Si}}$ в выражении (2). Кроме того, из-за возникших преципитатов галлия атомы кремния в приповерхностной области не образуют сплошной аморфной структуры и среднее значение энергии связи атомов кремния уменьшается. Как показано в работах [14, 15], такое уменьшение можно учесть, если для U_{Si} вместо формулы (1) использовать выражение

$$U_{\text{Si}} = C_{\text{Si}} U_{\text{Si-Si}} + C_{\text{Ga}} (1 - \alpha_1) U_{\text{Si-Si}},$$

где α_1 – параметр, характеризующий ослабление взаимодействия между атомами кремния вследствие образования преципитатов галлия.

Параметр α_1 позволяет получить более медленное убывание U_{Si} с ростом концентрации имплантированных атомов галлия по сравнению с CVM, которая реализуется в предельном случае при $\alpha_1 = 1$. Варьирование параметра α_1 при выборе $U_{\text{Si-Si}}$ и $U_{\text{Ga-Ga}}$, как в CVM, позволило получить реалистичные значения для отношения коэффициентов распыления кристаллического кремния и переосажденного при облучении материала. Однако при этом расчетные и экспериментальные профили концентрации имплантированных атомов галлия заметно отличались друг от друга [14, 15]. Поэтому в настоящей работе для получения реалистичных профилей $C_{\text{Ga}}(x)$ при моделировании процесса распыления варьировали значения $U_{\text{Si-Si}}$, $U_{\text{Ga-Ga}}$ и α_1 . Предварительные расчеты показали, что варьирование энергии связи $U_{\text{Si-Si}}$ не оказывает существенного влия-

ния на профиль концентрации атомов галлия, и поэтому ее значение выбрано таким же, как в CVM.

Для сравнения текущих результатов моделирования при варьировании $U_{\text{Ga-Ga}}$ и α_1 с экспериментальными данными использовали R -фактор [13]. При этом расчетные и экспериментальные значения $C_{\text{Ga}}(x)$ сравнивали во всем диапазоне значений x , а не только в области пиковых концентраций атомов галлия, как в работе [3]. R -фактор вычисляли на основе выражения

$$R = R_Y + R_C,$$

где

$$R_Y = \frac{(Y - Y_3)^2}{Y_3^2}, \quad R_C = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{(C_{\text{Ga}}^{(i)} - C_{\text{Ga}3}^{(i)})^2}{C_{\text{Ga max}}^2}.$$

Здесь Y и Y_3 – расчетное и экспериментальное значения коэффициентов распыления; N – количество точек на расчетных профилях концентрации $C_{\text{Ga}}(x)$, показанных на рис. 1 и 2; $C_{\text{Ga}}^{(i)}$ и $C_{\text{Ga}3}^{(i)}$ – концентрации галлия в i -й точке расчетного и экспериментального профилей; $C_{\text{Ga max}}$ – максимальное значение концентрации галлия в экспериментальном профиле.

Определение параметров модели поверхностной энергии связи. Для получения первого набора DCVM⁽¹⁾ оптимальных значений параметров $U_{\text{Ga-Ga}}$ и α_1 коэффициенты распыления сопоставляли с данными, приведенными в работе [15], а расчетные профили концентрации атомов галлия сравнивали с экспериментальными распределениями (см. рис. 1), соответствующими стационарному режиму распыления для трех значений ускоряющего напряжения ионов 8, 16 и 30 кВ. Параметры $U_{\text{Ga-Ga}}$ и α_1 варьировали в пределах 0–10 эВ и 0–1,0 с шагами 0,5 эВ и 0,1 соответственно. Полученные значения R_Y и R_C для каждой из энергий падающего пучка суммировали для нахождения $R_{Y\Sigma}$ и $R_{C\Sigma}$ и последующего вычисления величины $R_\Sigma = R_{Y\Sigma} + R_{C\Sigma}$, вариации которой иллюстрирует двумерная карта распределения R_Σ на рис. 3. Из рисунка видно, что R_Σ достигает минимума, отмеченного символом «○», при $U_{\text{Ga-Ga}}^{(1)} = 3,5$ эВ, $\alpha_1^{(1)} = 0,2$ и лишь незначительно меняется в широком диапазоне значений параметра α_1 . Полученное значение $U_{\text{Ga-Ga}}^{(1)} = 3,5$ эВ превышает обычно используемое при моделировании значение энергии сублимации, равное 2,8 эВ [25].

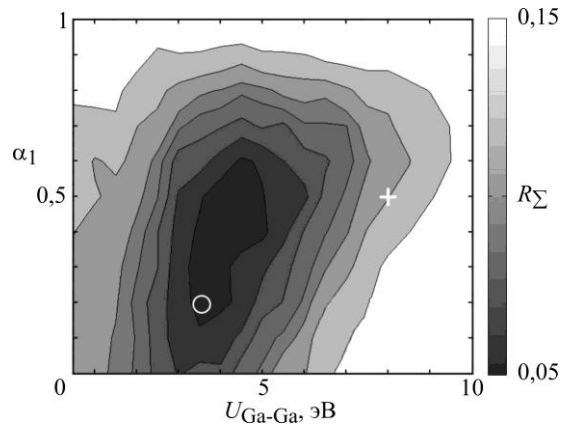


Рис. 3. Двумерное распределение суммарного R_Σ для трех ускоряющих напряжений ионного пучка (символами «○» и «+» отмечены точки, соответствующие наборам параметров DCVM⁽¹⁾ и DCVM⁽²⁾)

Fig. 3. Two-dimensional distribution of total R_Σ for three accelerating voltages of the ion beam (the symbols «○» and «+» indicate the points corresponding to the DCVM⁽¹⁾ and DCVM⁽²⁾ parameter sets)

На рис. 1 зависимости $C_{\text{Ga}}(x)$, соответствующие $U_{\text{Ga-Ga}}^{(1)}$ и $\alpha_1^{(1)}$, показаны вместе с расчетными профилями концентрации имплантированных атомов, вычисленными с применением SVM. Из рисунка следует, что использование дискретно-непрерывной модели с первым набором параметров DCVM⁽¹⁾ позволяет улучшить согласие расчетных и экспериментальных профилей примерно на 4–7 ат. % по сравнению с SVM. Однако для профилей, соответствующих энергии падающих ионов 16 и 30 кэВ, между результатами моделирования и экспериментальными данными сохраняются существенные расхождения. Отметим, что найденные значения $U_{\text{Ga-Ga}}^{(1)}$ и $\alpha_1^{(1)}$ приводят к отношению коэффициентов распыления переосажденного материала и химически чистого Si, равному 1,18, что хуже совпадает с экспериментальным значением, близким к 1,3, чем величина, полученная при моделировании процесса распыления с использованием DCVM с предложенными в работе [15] значениями параметров.

Поскольку для наиболее часто используемого и практически важного ускоряющего напряжения ионного пучка 30 кВ набор параметров DCVM⁽¹⁾ не обеспечивает удовлетворительного согласия между расчетными и экспериментальными профилями $C_{\text{Ga}}(x)$, на основе сравнения результатов моделирования и экспериментальных данных только для ионов с энергией 30 кэВ найден второй набор значений параметров DCVM⁽²⁾: $U_{\text{Ga-Ga}}^{(2)} = 8$ эВ и $\alpha_1^{(2)} = 0,5$. Он соответствует точке, отмеченной символом «+» на рис. 3. Как видно из рис. 1, б, в, набор параметров DCVM⁽²⁾ позволяет удовлетворительно описывать экспериментальные профили при энергиях падающих ионов 16 и 30 кэВ, однако при ускоряющем напряжении 8 кВ (см. рис. 1, а) различия между результатами моделирования и данными эксперимента увеличиваются по сравнению с расчетами, выполненными с применением DCVM⁽¹⁾. Из рис. 1 также следует, что для расчетных профилей $C_{\text{Ga}}(x)$, полученных с использованием всех рассмотренных моделей, характерно уменьшение концентрации имплантированной примеси непосредственно вблизи поверхности подложки с ростом ускоряющего напряжения. Отметим также, что в этой области расчетные и экспериментальные значения концентраций существенно отличаются друг от друга.

В таблице приведены результаты моделирования для SVM и DCVM с наборами параметров DCVM⁽¹⁾, DCVM⁽²⁾ и экспериментальные данные. Для всех рассматриваемых случаев расчетные и экспериментальные значения коэффициента распыления хорошо совпадают друг с другом, основной вклад в величину R_{Σ} вносит компонент $R_{\Sigma\text{с}}$, значения которого определяются различиями в профилях концентрации атомов галлия.

При использовании SVM значения R -фактора относительно невелики и практически одинаковы при ускоряющих напряжениях 8 и 30 кВ. Однако при энергии падающих ионов, равной 16 кэВ, R -фактор значительно возрастает. Применение дискретно-непрерывной модели с набором параметров DCVM⁽¹⁾ приводит к уменьшению различий между результатами моделирования и экспериментальными данными по сравнению с SVM, что следует из сравнения R_{Σ} для этих моделей. Такие различия, прежде всего, становятся меньше при ускоряющем напряжении 16 кВ в основном благодаря более точному расчетному значению коэффициента распыления, при этом R_{Σ} лишь незначительно уменьшается при других энергиях падающих ионов.

**Результаты расчетов параметров моделирования с использованием
различных моделей ПЭС**
**Results of calculation of simulation parameters using various models
of surface binding energies**

Ускоряющее напряжение, кВ	Коэффициент распыления, R -фактор	CVM	DCVM ⁽¹⁾	DCVM ⁽²⁾	Экспе- римент
		$U_{\text{Ga-Ga}}=2,8$ эВ, $U_{\text{Ga-Si}}=2,8$ эВ	$U_{\text{Ga-Ga}}^{(1)}=3,5$ эВ, $\alpha_1^{(1)}=0,2$	$U_{\text{Ga-Ga}}^{(2)}=8$ эВ, $\alpha_1^{(2)}=0,5$	
8	Y	1,87	1,74	1,74	1,8
	$R_Y(R_C)$	0,002 (0,016)	0,001 (0,016)	0,001(0,095)	—
	R	0,018	0,017	0,096	—
16	Y	2,17	2,06	2,10	2,0
	$R_Y(R_C)$	0,007 (0,022)	0,001 (0,013)	0,003 (0,013)	—
	R	0,029	0,014	0,016	—
30	Y	2,36	2,28	2,32	2,5
	$R_Y(R_C)$	0,003 (0,020)	0,008 (0,012)	0,005 (0,002)	—
	R	0,023	0,020	0,007	—
Суммарные значения	$R_{Y\Sigma}(R_{C\Sigma})$	0,012 (0,058)	0,009 (0,047)	0,009 (0,109)	—
	R_Σ	0,070	0,056	0,118	—

Использование набора параметров DCVM⁽²⁾ позволяет существенно улучшить согласие экспериментальных и расчетных профилей концентраций атомов галлия для наиболее часто используемого ускоряющего напряжения 30 кВ, о чем свидетельствует относительно небольшое значение R_C в этом случае. Отметим, что для энергии падающих ионов 16 кэВ расчетные и экспериментальные профили $C_{\text{Ga}}(x)$ визуально становятся более близкими, чем для других моделей, R_C при этом почти не изменяется. Отметим, что набор параметров DCVM⁽²⁾ не может быть использован для моделирования ионной бомбардировки при энергии 8 кэВ из-за существенной переоценки количества имплантированных в подложку атомов галлия (см. рис. 1, а), что приводит приблизительно к пятикратному увеличению значения R -фактора в этом случае.

Наряду с CVM дискретно-непрерывную модель с набором параметров DCVM⁽¹⁾ и DCVM⁽²⁾ использовали для моделирования профилей концентрации атомов галлия $C_{\text{Ga}}(x)$ при дозах облучения, соответствующих экспериментальным данным (см. рис. 2). Из рис. 2, а следует, что при малой дозе ионов $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ выбор модели для вычисления ПЭС практически не влияет на вид расчетного профиля $C_{\text{Ga}}(x)$, который имеет приблизительно гауссову форму и близок к экспериментальному распределению. Такое совпадение расчетных и экспериментальных профилей объясняется малой концентрацией атомов галлия в образце, и поэтому выбор модели для определения энергии связи атомов галлия между собой и с атомами кремния не имеет существенного значения.

При дозе $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 2, б) использование CVM и DCVM⁽¹⁾ с первым набором параметров позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать экспериментальный профиль $C_{\text{Ga}}(x)$. Однако уже при увеличении дозы ионов до значения $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 2, в), при котором образуются преципитаты атомов галлия, использование CVM становится недостаточным, в то время как применение DCVM⁽¹⁾ позволяет точнее вычислять экспериментальный профиль $C_{\text{Ga}}(x)$, хотя не все его особенности

воспроизводятся при моделировании. Отметим, что при дозах ионов $5 \cdot 10^{16}$ и $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ использование DCVM⁽²⁾ приводит к неудовлетворительным результатам при моделировании, поскольку в этих случаях количество имплантированных в образец атомов галлия еще недостаточно велико для ее эффективного применения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение стандартной непрерывной модели для нахождения ПЭС атомов галлия в общем случае недостаточно для моделирования распыления кремниевой подложки методом фокусированного ионного пучка. Причина – в изменении характера распределения имплантированных атомов Ga, которые располагаются между атомами кремния при малых дозах облучения и перераспределяются с образованием слоев преципитатов по мере увеличения их концентрации в аморфизованном слое кремниевой подложки. Такое перераспределение не может быть непосредственно принято во внимание при моделировании методом Монте-Карло в приближении бинарных столкновений, и поэтому его применение с использованием SVM для определения ПЭС атомов галлия приводит к согласующимся с экспериментом результатам только при малых дозах облучения. Дискретно-непрерывная модель с двумя наборами параметров позволяет косвенным образом учесть образование преципитатов галлия и получить профили концентрации атомов галлия, близкие к экспериментальным данным. Для набора параметров DCVM⁽²⁾, оптимального для моделирования распыления кремния в стационарном режиме при ускоряющем напряжении 30 кВ, энергия связи $U_{\text{Ga-Ga}} = 8 \text{ эВ}$ существенно превосходит как свое значение в наборе DCVM⁽¹⁾, так и обычно используемое значение 2,8 эВ. Столь значительное увеличение $U_{\text{Ga-Ga}}$ наряду с достаточно большим значением параметра $\alpha_1^{(2)} = 0,5$ позволяет эффективно описывать распыление атомов галлия из состоящего из преципитатов слоя галлия, который при облучении ионами с энергией 30 кэВ по сравнению с другими случаями имеет наибольшую протяженность вдоль оси x (см. рис. 1).

Отметим, что полученные в рамках дискретно-непрерывной модели значения $U_{\text{Ga-Ga}}$ коррелируют с результатами работы [27], где указывается, что существенная часть атомов может распыляться не из непосредственной приповерхностной области образца, а из объема материала, и поэтому необходима корректировка метода вычисления соответствующей энергии связи. В работе [28] показано, что ПЭС существенно зависит от структуры поверхности и может в разы превышать энергию сублимации.

Заключение. Сравнение результатов моделирования методом Монте-Карло распыления кремниевой подложки ионами галлия с использованием дискретно-непрерывной модели для вычисления ПЭС атомов с экспериментальными данными, полученными при распылении кремния фокусированным пучком в стационарном режиме с дозой ионов, близкой $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, и их энергиях вплоть до 30 кэВ, позволило определить два набора значений варьируемых параметров – ПЭС атомов галлия и величины α_1 , определяющей ПЭС атомов кремния. Первый набор параметров применим в условиях сравнительно небольшого количества имплантированных атомов галлия в кремниевой подложке. Он, в частности, реализуется при невысоком ускоряющем напряжении 8 кВ или при энергии ионов менее 30 кэВ и дозах, не превышающих $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Второй набор параметров позволяет с приемлемой точностью моделировать распыление кремния ионами галлия в стационарном режиме при энергии ионов 16 и 30 кэВ. Соответствующее этому набору параметров значение ПЭС галлия, равное 8 эВ, позволяет косвенно учитывать распыления Ga из аморфизованного кремния, в котором на разной глубине располагаются два-три слоя преципитатов атомов галлия.

Литература

1. Priolo F., Gregorkiewicz T., Galli M., Krauss T. F. Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics // *Nature Nanotech.* 2014. Vol. 9. Iss. 1. P. 19–32. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.271>
2. Self-organized nanopatterning of silicon surfaces by ion beam sputtering / J. Muñoz-García, L. Vázquez, M. Castro et al. // *Materials Science and Engineering: R: Reports.* 2014. Vol. 86. P. 1–44. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.09.001>
3. Garg V., Mote R. G., Fu J. Rapid prototyping of highly ordered subwavelength silicon nanostructures with enhanced light trapping // *Optical Materials.* 2019. Vol. 94. P. 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.05.020>
4. Chiral visible light metasurface patterned in monocrystalline silicon by focused ion beam / M. V. Gorkunov, O. Y. Rogov, A. V. Kondratov et al. // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. Iss. 1. Art. No. 11623. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29977-4>
5. Langridge M. T., Cox D. C., Webb R. P., Stolojan V. The fabrication of aspherical microlenses using focused ion-beam techniques // *Micron.* 2014. Vol. 57. P. 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2013.10.013>
6. Controlling the parameters of focused ion beam for ultra-precise fabrication of nanostructures / A. S. Kolomiitsev, A. L. Gromov, O. I. Il'in et al. // *Ultramicroscopy.* 2022. Vol. 234. Art. No. 113481. <https://doi.org/10.1016/j.ultramicro.2022.113481>
7. Stark Y., Frömter R., Stickler D., Oepen H. P. Sputter yields of single- and polycrystalline metals for application in focused ion beam technology // *Journal of Applied Physics.* 2009. Vol. 105. Iss. 1. Art. No. 013542. <https://doi.org/10.1063/1.3056161>
8. Inverse modeling of FIB milling by dose profile optimization / S. Lindsey, S. Waid, G. Hobler et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2014. Vol. 341. P. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.09.006>
9. Borgardt N. I., Volkov R. L., Rumyantsev A. V., Chaplygin Yu. A. Simulation of material sputtering with a focused ion beam // *Tech. Phys. Lett.* 2015. Vol. 41. P. 610–613. <https://doi.org/10.1134/S106378501506019X>
10. Gnaser H., Reuscher B., Brodyanski A. Focused ion beam implantation of Ga in nanocrystalline diamond: Fluence-dependent retention and sputtering // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2008. Vol. 266. Iss. 8. P. 1666–1670. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.12.080>
11. Gnaser H. Focused ion beam implantation of Ga in InP studied by SIMS and dynamic computer simulations // *Surf. Interface Anal.* 2011. Vol. 43. Iss. 1-2. P. 28–31. <https://doi.org/10.1002/sia.3398>
12. Румянцев А. В., Подорожний О. В., Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Моделирование процесса распыления карбида кремния фокусированным пучком ионов галлия // *Изв. вузов. Электроника.* 2022. Т. 27. № 4. С. 463–474. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-463-474>
13. Gnaser H., Brodyanski A., Reuscher B. Focused ion beam implantation of Ga in Si and Ge: Fluence-dependent retention and surface morphology // *Surf. Interface Anal.* 2008. Vol. 40. Iss. 11. P. 1415–1422. <https://doi.org/10.1002/sia.2915>
14. Borgardt N. I., Rumyantsev A. V., Volkov R. L., Chaplygin Yu. A. Sputtering of redeposited material in focused ion beam silicon processing // *Mater. Res. Express.* 2018. Vol. 5. No. 2. Art. No. 025905. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1>
15. Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Volkov R. L. Simulation of redeposited silicon sputtering under focused ion beam irradiation // *J. Surf. Investig.* 2018. Vol. 12. P. 607–612. <https://doi.org/10.1134/S1027451018030345>
16. Angular dependences of silicon sputtering by gallium focused ion beam / V. I. Bachurin, I. V. Zhuravlev, D. E. Pukhov et al. // *J. Surf. Investig.* 2020. Vol. 14. P. 784–790. <https://doi.org/10.1134/S1027451020040229>
17. Liedke B., Heinig K.-H., Möller W. Surface morphology and interface chemistry under ion irradiation – Simultaneous atomistic simulation of collisional and thermal kinetics // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2013. Vol. 316. P. 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.08.036>
18. Kudriavtsev Y., Villegas A., Godines A., Asomoza R. Calculation of the surface binding energy for ion sputtered particles // *Applied Surface Science.* 2005. Vol. 239. Iss. 3-4. P. 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.06.014>

19. Sputtering of surfaces by ion irradiation: A comparison of molecular dynamics and binary collision approximation models to laboratory measurements / **L. S. Morrissey, O. J. Tucker, R. M. Killen et al.** // Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 130. Iss. 1. Art. No. 013302. <https://doi.org/10.1063/5.0051073>
20. Modelling of sputtering yield amplification in serial reactive magnetron co-sputtering / **T. Kubart, R. M. Schmidt, M. Austgen et al.** // Surface and Coatings Technology. 2012. Vol. 206. Iss. 24. P. 5055–5059. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.005>
21. Solar wind ion sputtering of sodium from silicates using molecular dynamics calculations of surface binding energies / **L. S. Morrissey, O. J. Tucker, R. M. Killen et al.** // ApJL. 2022. Vol. 925. No. 1. Art. ID: L6. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac42d8>
22. **Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J.** TEM sample preparation and FIB-induced damage // MRS Bulletin. 2007. Vol. 32. Iss. 5. P. 400–407. <https://doi.org/10.1557/mrs2007.63>
23. Comprehensive study of focused ion beam induced lateral damage in silicon by scanning probe microscopy techniques / **M. Rommel, G. Spoldi, V. Yanev et al.** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2010. Vol. 28. Iss. 3. P. 595–607. <https://doi.org/10.1116/1.3431085>
24. SDTrimSP Version 5.05 / **A. Mutzke, R. Schneider, W. Eckstein et al.** Garching: IPP, 2015. 70 p.
25. **Eckstein W.** Computer simulation of ion-solid interactions. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. XI, 296 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73513-4>
26. **Lindsey S., Hobler G.** Sputtering of silicon at glancing incidence // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2013. Vol. 303. P. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.087>
27. **Hofsäss H., Stegmaier A.** Binary collision approximation simulations of ion solid interaction without the concept of surface binding energies // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2022. Vol. 517. P. 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.02.012>
28. **Guénolé J., Prakash A., Bitzek E.** Influence of intrinsic strain on irradiation induced damage: The role of threshold displacement and surface binding energies // Materials and Design. 2016. Vol. 111. P. 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.077>

Статья поступила в редакцию 03.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 26.04.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Подорожний Олег Витальевич – аспирант Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), podorozhniyoleg98@gmail.com

Румянцев Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), rumyantsev.alexander4@gmail.com

Волков Роман Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), r.l.volkov@org.miet.ru

Боргардт Николай Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики и прикладной математики, начальник Научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), borgardt@miee.ru

References

1. Priolo F., Gregorkiewicz T., Galli M., Krauss T. F. Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics. *Nature Nanotech.*, 2014, vol. 9, iss. 1, pp. 19–32. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.271>
2. Muñoz-García J., Vázquez L., Castro M., Gago R., Redondo-Cubero A., Moreno-Barrado A., Cuerno R. Self-organized nanopatterning of silicon surfaces by ion beam sputtering. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2014, vol. 86, pp. 1–44. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.09.001>
3. Garg V., Mote R. G., Fu J. Rapid prototyping of highly ordered subwavelength silicon nanostructures with enhanced light trapping. *Optical Materials*, 2019, vol. 94, pp. 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.05.020>
4. Gorkunov M. V., Rogov O. Y., Kondratov A. V., Artemov V. V., Gainutdinov R. V., Ezhov A. A. Chiral visible light metasurface patterned in monocrystalline silicon by focused ion beam. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, iss. 1, art. no. 11623. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29977-4>
5. Langridge M. T., Cox D. C., Webb R. P., Stolojan V. The fabrication of aspherical microlenses using focused ion-beam techniques. *Micron*, 2014, vol. 57, pp. 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2013.10.013>
6. Kolomiitsev A. S., Gromov A. L., Il'in O. I., Panchenko I. V., Kotosonova A. V., Ballouk A., Rodriguez D., Ageev O. A. Controlling the parameters of focused ion beam for ultra-precise fabrication of nanostructures. *Ultramicroscopy*, 2022, vol. 234, art. no. 113481. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2022.113481>
7. Stark Y., Frömter R., Stickler D., Oepen H. P. Sputter yields of single- and polycrystalline metals for application in focused ion beam technology. *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 105, iss. 1, art. no. 013542. <https://doi.org/10.1063/1.3056161>
8. Lindsey S., Waid S., Hobler G., Wanzenböck H. D., Bertagnolli E. Inverse modeling of FIB milling by dose profile optimization. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2014, vol. 341, pp. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.09.006>
9. Borgardt N. I., Volkov R. L., Rumyantsev A. V., Chaplygin Yu. A. Simulation of material sputtering with a focused ion beam. *Tech. Phys. Lett.*, 2015, vol. 41, pp. 610–613. <https://doi.org/10.1134/S106378501506019X>
10. Gnaser H., Reuscher B., Brodyanski A. Focused ion beam implantation of Ga in nanocrystalline diamond: Fluence-dependent retention and sputtering. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2008, vol. 266, iss. 8, pp. 1666–1670. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.12.080>
11. Gnaser H. Focused ion beam implantation of Ga in InP studied by SIMS and dynamic computer simulations. *Surf. Interface Anal.*, 2011, vol. 43, iss. 1-2, pp. 28–31. <https://doi.org/10.1002/sia.3398>
12. Rumyantsev A. V., Podorozhnyi O. V., Volkov R. L., Borgardt N. I. Simulation of silicon carbide sputtering by gallium focused ion beam. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 463–474. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-463-474>
13. Gnaser H., Brodyanski A., Reuscher B. Focused ion beam implantation of Ga in Si and Ge: Fluence-dependent retention and surface morphology. *Surf. Interface Anal.*, 2008, vol. 40, iss. 11, pp. 1415–1422. <https://doi.org/10.1002/sia.2915>
14. Borgardt N. I., Rumyantsev A. V., Volkov R. L., Chaplygin Yu. A. Sputtering of redeposited material in focused ion beam silicon processing. *Mater. Res. Express*, 2018, vol. 5, no. 2, art. no. 025905. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1>
15. Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Volkov R. L. Simulation of redeposited silicon sputtering under focused ion beam irradiation. *J. Surf. Investig.*, 2018, vol. 12, pp. 607–612. <https://doi.org/10.1134/S1027451018030345>
16. Bachurin V. I., Zhuravlev I. V., Pukhov D. E., Rudy A. S., Simakin S. G., Smirnova M. A., Churilov A. B. Angular dependences of silicon sputtering by gallium focused ion beam. *J. Surf. Investig.*, 2020, vol. 14, pp. 784–790. <https://doi.org/10.1134/S1027451020040229>
17. Liedke B., Heinig K.-H., Möller W. Surface morphology and interface chemistry under ion irradiation – Simultaneous atomistic simulation of collisional and thermal kinetics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, vol. 316, pp. 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.08.036>
18. Kudriavtsev Y., Villegas A., Godines A., Asomoza R. Calculation of the surface binding energy for ion sputtered particles. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 239, iss. 3-4, pp. 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.06.014>

19. Morrissey L. S., Tucker O. J., Killen R. M., Nakhla S., Savin D. W. Sputtering of surfaces by ion irradiation: A comparison of molecular dynamics and binary collision approximation models to laboratory measurements. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 130, iss. 1, art. no. 013302. <https://doi.org/10.1063/5.0051073>
20. Kubart T., Schmidt R. M., Austgen M., Nyberg T., Pflug A., Siemers M., Wuttig M., Berg S. Modelling of sputtering yield amplification in serial reactive magnetron co-sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, iss. 24, pp. 5055–5059. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.005>
21. Morrissey L. S., Tucker O. J., Killen R. M., Nakhla S., Savin D. W. Solar wind ion sputtering of sodium from silicates using molecular dynamics calculations of surface binding energies. *ApJL*, 2022, vol. 925, no. 1, art. ID: L6. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac42d8>
22. Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J. TEM sample preparation and FIB-induced damage. *MRS Bulletin*, 2007, vol. 32, iss. 5, pp. 400–407. <https://doi.org/10.1557/mrs2007.63>
23. Rommel M., Spoldi G., Yanev V., Beuer S., Amon B., Jambreck J., Petersen S., Frey L. Comprehensive study of focused ion beam induced lateral damage in silicon by scanning probe microscopy techniques. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2010, vol. 28, iss. 3, pp. 595–607. <https://doi.org/10.1116/1.3431085>
24. Mutzke A., Schneider R., Eckstein W. et al. *SDTrimSP Version 5.05*. Garching, IPP, 2015. 70 p.
25. Eckstein W. *Computer simulation of ion-solid interactions*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013. xi, 296 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73513-4>
26. Lindsey S., Hobler G. Sputtering of silicon at glancing incidence. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, vol. 303, pp. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.087>
27. Hofsäss H., Stegmaier A. Binary collision approximation simulations of ion solid interaction without the concept of surface binding energies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2022, vol. 517, pp. 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.02.012>
28. Guénolé J., Prakash A., Bitzek E. Influence of intrinsic strain on irradiation induced damage: The role of threshold displacement and surface binding energies. *Materials and Design*, 2016, vol. 111, pp. 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.077>

The article was submitted 03.04.2023; approved after reviewing 26.04.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Oleg V. Podorozhnyi – PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), podorozhniyoleg98@gmail.com

Alexander V. Rumyantsev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), rumyantsev.alexander4@gmail.com

Roman L. Volkov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), r.l.volkov@org.miet.ru

Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Director of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Head of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), borgardt@miee.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Обзорная статья

УДК 621.389

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-5-569-599

EDN: ZUKRLA

Вакуумная наноэлектроника на основе полупроводниковых автоэмиссионных структур: текущее состояние и перспективы развития. Обзор

Н. А. Дюжев, И. Д. Евсиков

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва,
Россия*

evsikov.ilija@yandex.ru

Аннотация. Развитие полупроводниковой интегральной технологии и переход к нанометровому разрешению литографического процесса обусловили разработку полупроводниковых автоэмиссионных структур. Однако широкого внедрения в производство и коммерциализации комплекс технологий изготовления автоэмиссионных устройств в настоящее время не получил из-за их малого срока эксплуатации и недостаточной стабильности работы. В работе проведен сравнительный анализ полученных на сегодняшний день значимых результатов по разработке полупроводниковых автоэмиссионных структур с наноразмерным каналом проводимости с целью оценки текущего состояния и перспектив дальнейшего развития вакуумной наноэлектроники. Проанализированы технологические и эксплуатационные проблемы разработки автоэмиссионных триодных наноразмерных структур с применением различных полупроводниковых материалов. Показаны достигнутые успехи в области интеграции наноразмерных автоэмиссионных структур со стандартными КМОП-транзисторами. Рассмотрены возможные сферы применения структур вакуумной наноэлектроники. Описаны актуальные задачи данной научной отрасли, а также проблемы, возникающие в процессе внедрения элементной базы вакуумной наноэлектроники в цикл разработки и коммерциализации технологии вакуумных ИС.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, КМОП-технология, полупроводниковые автоэмиссионные наноструктуры, кремний, карбид кремния

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-12-50312(20)).

Для цитирования: Дюжнев Н. А., Евсиков И. Д. Вакуумная наноэлектроника на основе полупроводниковых автоэмиссионных структур: текущее состояние и перспективы развития. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 569–599. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-569-599>. – EDN: ZUKRLA.

Review article

Vacuum nanoelectronics based on semiconductor field emission structures: current state and development prospects. Review

N. A. Djuzhev, I. D. Evsikov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

evsikov.ilija@yandex.ru

Abstract. The advances in semiconductor integrated technology and transition to nanometer resolution in lithography process have given rise to semiconductor field emission structures development. However, nowadays the suite of field emission devices technology has got neither large-scale manufacturing application nor commercialization due to their short useful life and insufficient operational stability. In this work, a comparative analysis of the significant results obtained to date in the development of semiconductor field emission devices with a nanoscale conduction channel is carried out to evaluate the current state and prospects for further development of vacuum nanoelectronics. The technological and operational problems of developing field emission triode structures using various semiconductor materials have been analyzed. The progress achieved in the field of integration of nanoscale field emission devices with standard CMOS transistors is shown. Possible areas of application of vacuum nanoelectronic devices are considered. The urgent tasks of this scientific industry, as well as the problems that arise in the process of introducing the element base of vacuum nanoelectronics into the development and commercialization cycle of vacuum IC technology are described.

Keywords: field-electron emission, CMOS technology, semiconductor field emission nanostructures, silicon, silicon carbide

Funding: the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-12-50312\20).

For citation: Djuzhev N. A., Evsikov I. D. Vacuum nanoelectronics based on semiconductor field emission structures: current state and development prospects. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 569–599. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-569-599>. – EDN: ZUKRLA.

Введение. Вакуумная микроэлектроника начинает развиваться в 1960-х гг. В то время в научных изданиях появляются работы, посвященные разработке технологии изготовления микроразмерных автоэмиссионных триодов, которые могли составить конкуренцию используемым термоэлектронным триодам в усилительной и приемопередающей электронике. Внедрение технологии автоэмиссионных микроразмерных триодов было затруднено по двум основным причинам: недостаточный общий уровень

развития микроэлектроники на тот период и проблемы, связанные с эксплуатационными характеристиками разрабатываемых триодов. Развитие полупроводниковой интегральной технологии и переход к нанометровому разрешению литографического процесса обусловили необходимость разработки автоэмиссионных структур.

Публикации начала 2010-х гг. группы американских исследователей из Центра нанотехнологий НАСА демонстрируют продолжающийся интерес к разработке вакуумных автоэмиссионных структур с наноразмерным каналом проводимости, создаваемых на базе полупроводниковой интегральной технологии. Однако, несмотря на достигнутый прогресс в области создания микро- и наноразмерных автоэмиссионных структур, широкого внедрения в производство и коммерциализации комплекс технологий автоэмиссионных устройств в настоящее время не получил ввиду малого срока эксплуатации и недостаточной стабильности их работы.

В настоящей работе дается обзор литературных источников, посвященных исследованию автоэмиссионных структур вакуумной наноэлектроники, созданных с применением различных полупроводниковых материалов, рассматриваются основные эксплуатационные проблемы разработки автоэмиссионных структур, приводятся варианты их решения.

Физические принципы вакуумной наноэлектроники. В основе принципа работы автоэмиссионной электроники лежит явление автоэлектронной эмиссии. Автоэлектронная, или холодная либо полевая, эмиссия проявляется при создании на поверхности жидкого или твердого тела внешнего электрического поля высокой напряженности (более 10^7 В/см). Электрическое поле при этом снижает потенциальный барьер на границе тело – вакуум и сужает его настолько, что электроны в теле эмиттера приобретают способность без потери энергии проходить через этот барьер.

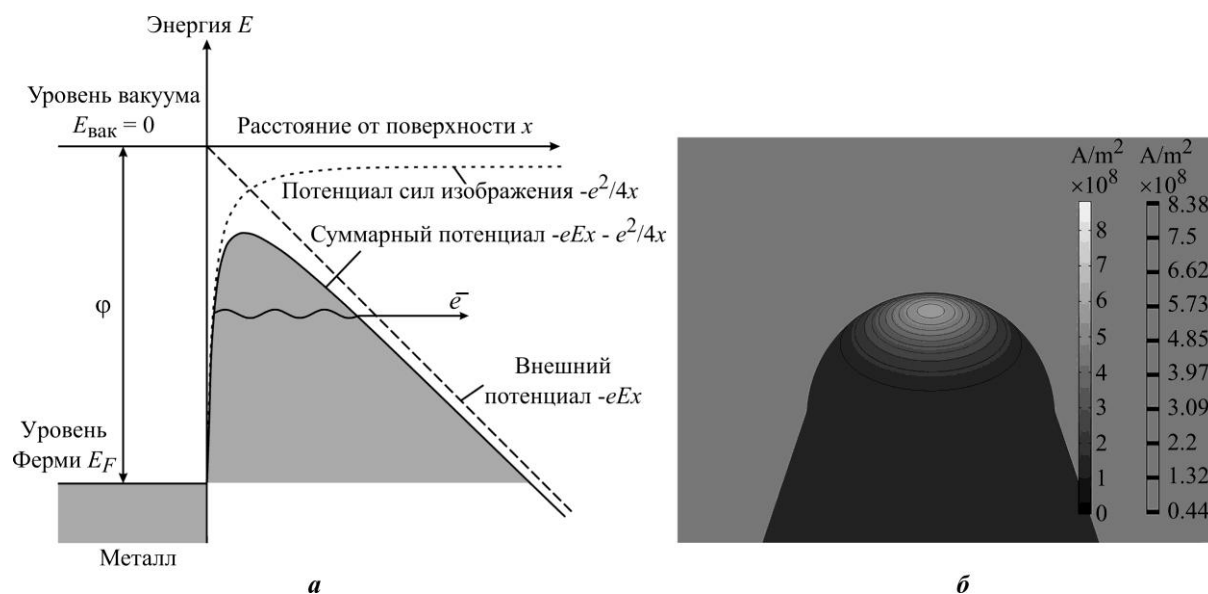


Рис. 1. Диаграмма потенциальной энергии для электронов у поверхности металла в случае приложенного внешнего электрического поля напряженностью E (а) и моделирование распределения тока автоэлектронной эмиссии на вершине острейного эмиттера (б): ϕ – работа выхода металла в отсутствие приложенного электрического поля; e – заряд электрона; светлый участок на вершине острия – область наибольшей плотности тока автоэмиссии

Fig. 1. Potential energy diagram for electrons near the surface of a metal in the case of an applied external electric field of strength E (a) and simulation of field emission current distribution at the top of a needle-type emitter (b): ϕ – metal output work in the absence of an applied electric field; e – the electron charge; the light area at the top of the tip is the area of the highest auto emission density

В настоящее время наиболее разработанная и полная модель автоэлектронной эмиссии металлов построена для так называемого барьера сил электрического изображения. На рис. 1, а приведена потенциальная диаграмма, поясняющая данную модель автоэлектронной эмиссии. Суммарный потенциал равен сумме потенциала сил изображения и потенциала внешнего приложенного поля.

Впервые теория автоэлектронной эмиссии из металлов была сформулирована Фаулером и Нордгеймом на основе полуклассического подхода для одномерной модели, применимой к плоскому катоду [1, 2]. Теория Фаулера – Нордгейма дает корректное качественное и в ряде случаев количественное объяснение высокой чувствительности плотности автоэмиссионного тока относительно напряженности электрического поля, приложенного к поверхности тела.

Современная форма записи выражения, которым определяется зависимость плотности тока (А/см^2) автоэлектронной эмиссии от напряженности поля, имеет следующий вид:

$$j = \frac{e^3}{8\pi h} \frac{E^2}{t^2(y)\phi} \exp\left(-\frac{8\pi}{3} \frac{\sqrt{2m_e}}{eh} \frac{\phi^{3/2}}{E} \vartheta(y)\right)$$

или в приведенной форме:

$$j = 1,54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{t^2(y)\phi} \exp\left(-6,83 \cdot 10^7 \frac{\phi^{3/2}}{E} \vartheta(y)\right), \quad (1)$$

где e – элементарный заряд; h – постоянная Планка; E – локальная напряженность приложенного электрического поля, В/см; m_e – масса электрона; $\vartheta(y)$ – функция Нордгейма (в зарубежной литературе обозначаемая как $\nu(y)$); ϕ – работа выхода материала эмитируемой поверхности, эВ. При этом $y = 3,79 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{E}{\phi}}$, $t(y) = \vartheta(y) - \left(\frac{2y}{3}\right) \left(\frac{d\vartheta(y)}{dy}\right)$, значения функций $\vartheta(y)$ и $t(y)$ табулированы [3].

Коэффициенты в выражении (1) $1,54 \cdot 10^{-6}$ и $6,83 \cdot 10^7$ в научной литературе иногда называются первой и второй константами Фаулера – Нордгейма и в краткой форме записи уравнения (1) обозначаются как A и B соответственно. В качестве поясняющей иллюстрации на рис. 1, б приведено изображение результатов моделирования распределения тока автоэлектронной эмиссии на поверхности конического острия с полусферической вершиной, полученное в среде мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics.

Разработанная Фаулером и Нордгеймом теория вполне корректно описывала экспоненциальную зависимость плотности автоэлектронного тока от напряженности электрического поля, что подтверждалось ранними экспериментальными исследованиями. Начиная с 1950-х гг. в научной литературе появляются экспериментальные работы, описывающие различные явления и факторы, которые не укладываются в классическую теорию автоэмиссии Фаулера – Нордгейма: влияние эффектов пространственного заряда, джоулевого разогрева и эффекта Ноттингама, «неклассический» характер автоэлектронной эмиссии с полупроводников, отклонения от теоретических расчетов при автоэмиссии с острием атомарного масштаба или в области сильных полей и высоких плотностей тока [4].

Среди современных исследователей автоэлектронной эмиссии определенного успеха при решении задач теоретического характера в общем случае и в случае металлов

добились Р. Форбс (уточненная теория автоэлектронной эмиссии металлов [5, 6]), К. Дженсен (объединенная теория термо- и автоэлектронной эмиссии [7, 8]), Б. Лепетит (квантово-механический подход к расчету тока автоэлектронной эмиссии [9, 10]), А. Киритсакис (исследование влияния различных факторов на автоэлектронную эмиссию [11, 12]).

Разработка физико-математических моделей автоэлектронной эмиссии полупроводников представляется более трудоемкой задачей по сравнению с моделями металлической автоэмиссии. Полупроводники характеризуются более низкой концентрацией носителей заряда в объеме эмиттера, что способствует проникновению электрического поля в полупроводник и изгибу энергетических зон. Данная особенность также может вызывать термо- и фоточувствительность, а также характерный эффект появления участка насыщения вольт-амперных зависимостей полупроводникового автоэмиттера. Затрудняют задачу сложности экспериментального наблюдения и интерпретирования эффектов, сопутствующих полупроводниковой эмиссии, связанные с их плохой воспроизводимостью. Существующие теоретические модели автоэлектронной эмиссии полупроводников описывают узкий круг физических эффектов и не могут полностью объяснить наблюдаемые в эксперименте ВАХ [13, 14].

Таким образом, полная и законченная теория автоэлектронной эмиссии из металлов и полупроводников не разработана. Задача создания непротиворечивой теоретической модели автоэлектронной эмиссии важна как из теоретических, так и из практических соображений, поскольку при разработке новых автоэмиссионных устройств возникает необходимость расчета рабочих характеристик создаваемого прибора при различных входных параметрах модели (геометрия электродов, тип материала эмиттера и т. п.). До тех пор пока такая теоретическая модель автоэлектронной эмиссии не будет создана, расчеты характеристик автоэмиссионных устройств будут носить оценочный характер, не претендующий на высокую точность получаемых результатов.

Эксплуатационные проблемы вакуумной наноэлектроники. Началом исследований в области вакуумной микроэлектроники можно считать доклад Д. Бака и К. Шоулдерса, представленный на американской конференции, посвященной исследованиям и разработкам в вычислительной электронике [15]. Доклад содержал планы по созданию электронных приборов с линейными размерами порядка 0,1 мкм с использованием методов интегральной технологии, в том числе и приборов на основе автоэлектронной эмиссии. В 1961 г. опубликована знаковая для всей вакуумной микро- и наноэлектроники работа Шоулдерса, посвященная перспективам создания микроразмерных устройств с применением электронно-лучевой технологии [16]. В работе сформулированы технологические и конструкционные подходы к формированию автоэмиссионных микроструктур. Шоулдерс предложил два типа конструкций автоэмиссионных приборов: планарную конструкцию, в которой все электроды устройства формируются в одном функциональном слое и представляют собой заостренные лезвия, и острейную конструкцию с формированием массива триодов с заостренными стержнями или конусами в нескольких функциональных слоях. Предполагалось использовать такие автоэмиссионные микроприборы в качестве активных компонентов в системах обработки сигналов, а также при создании инфракрасных сенсоров и электролюминесцентных источников света.

В 1966 г. на конференции IEEE Conference on Tube Technique [17] Ч. Спиндт и К. Шоулдерс представили первые практические результаты в области разработок автоэмиссионных микроустройств. В 1968 г. Спиндт публикует статью, посвященную технологии создания автоэмиссионных тонкопленочных катодов на основе молибдена [18], а через восемь лет выходит в свет работа, результатом которой стал детальный

анализ рабочих характеристик автоэмиссионных катодов, изготовленных по разработанной ранее технологии [19]. Интерес к разработкам Спиндта проявили Министерство обороны США и НАСА. Связано это с тем, что вакуумные приборы, исходя из физических принципов их работы, должны обладать высокой устойчивостью к радиационным эффектам накопленной дозы и перепадам температур в широких диапазонах, а также функционировать в сверхвысокочастотном диапазоне, что крайне необходимо при создании элементной базы космического применения.

Катоды Спиндта создавали методом электронно-лучевого осаждения молибдена на сапфировую или сильнолегированную кремниевую подложку. Вращение подложки вокруг своей оси и осаждение материалов под острым углом позволили получить массивы периодически расположенных структур, состоящих из острейного конусообразного катода и фокусирующего сеточного электрода, окружающего катод (рис. 2, а).

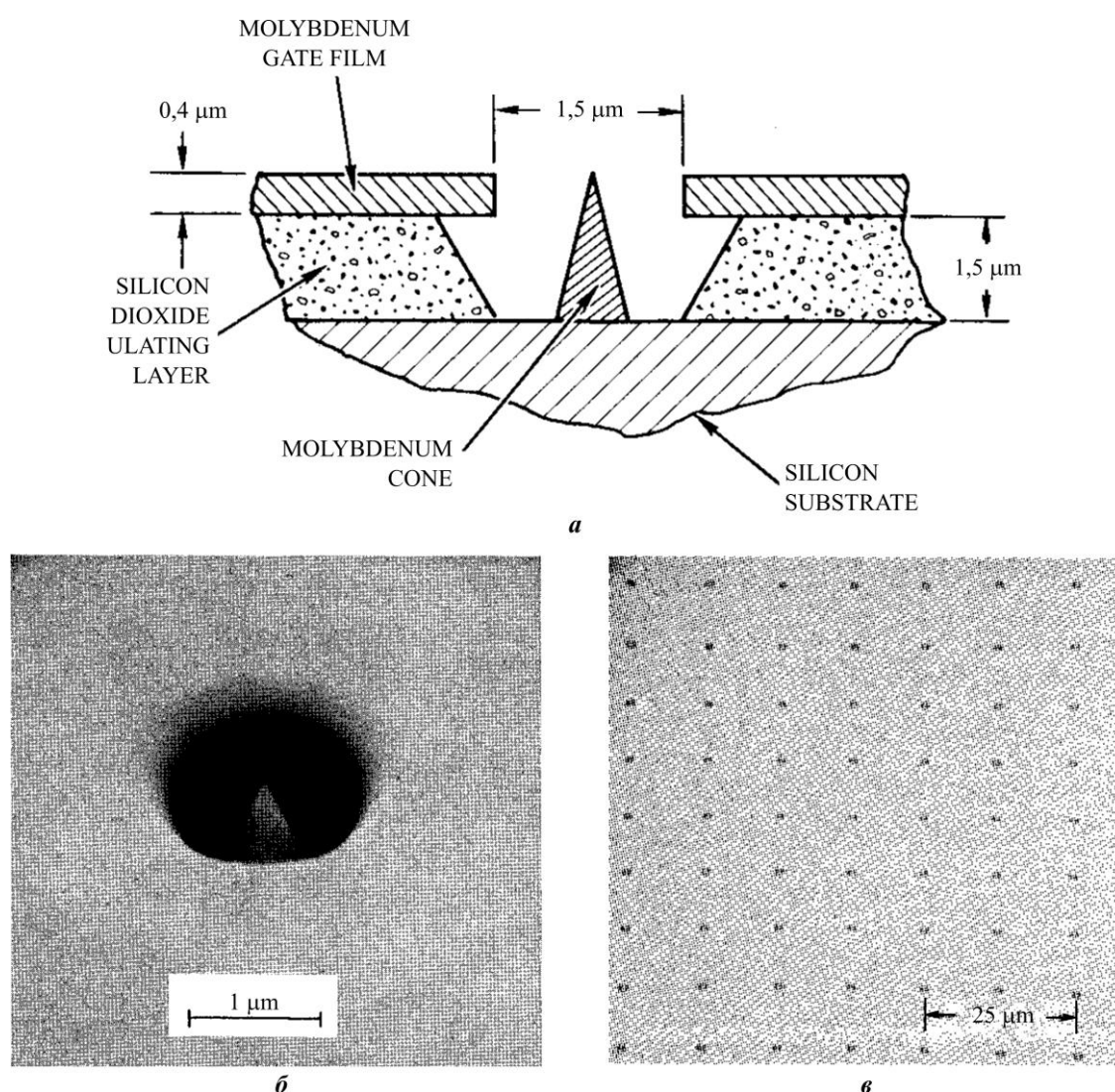


Рис. 2. Схематичное изображение конструкции молибденового триода Спиндта в разрезе (а), одиночный молибденовый триод Спиндта (б) и массив триодов Спиндта (в) [19]

Fig. 2. Schematic representation of the construction of the Spindt molybdenum triode in section (a), Spindt single molybdenum triode (b) and Spindt triode array (c) [19]

Создано несколько типов экспериментальных образцов с различным числом триодных структур: 1, 100 и 5000. Плотность упаковки молибденовых микротриодов в массиве составляла $6,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Диаметр сеточного отверстия полученных структур варьировался в пределах 1–3 мкм, высота молибденовых катодов составляла примерно 1,5 мкм, радиус закругления их вершин около 50 нм (рис. 2, б, в). Анод-коллектор триодов располагался над исследуемым образцом на расстоянии порядка нескольких сотен микрон. Средняя плотность тока по массиву оказалась равна приблизительно 10 А/см^2 . Результаты исследовательских испытаний триодов и собственные теоретические оценки авторов позволили сделать вывод о том, что разработанные массивы со 100 триодами Спиндта могут стабильно работать на протяжении нескольких тысяч часов в условиях сверхвысокого вакуума (от 10^{-9} торр и менее).

Для снятия ВАХ и зависимостей эмиссионного тока от времени к сеткам триодов подавали выпрямленное напряжение (положительные синусоидальные полуволны) с частотой 60 Гц, что позволило замедлить процесс распыления анода. Авторы работы [19] указывают на возникновение периодических взрывов катодов, которые почти всегда сопровождались полным выходом отдельного триода в массиве из строя. Предположительно, взрывные процессы происходили из-за возникновения газового разряда между катодом и сеточным электродом, который проявлялся в результате распыления функциональных слоев триода. Для устранения взрывов перед непосредственным проведением измерений вакуумную камеру подвергали дегазации с применением отжига при температуре 350–450 °С.

Эксплуатационные проблемы автоэмиссионных устройств возникают из-за фундаментального свойства всех вакуумных и газонаполненных эмиссионных приборов – транспорт электронов в межэлектродном пространстве осуществляется вне объема твердого тела с открытой поверхности катода. Данное свойство приводит к возникновению эффектов ионизации и плазмообразования, термических и механических эффектов, эффектов молекулярной сорбции и миграции.

Ионная бомбардировка представляет серьезную проблему обеспечения стабильности автоэмиссионного тока. Ионы в межэлектродном пространстве прибора могут образовываться в результате ионизации как молекул остаточных газов, так и молекул материалов функциональных слоев автоэмиссионного прибора при их распылении под действием бомбардировки. Следствием этих процессов может стать снижение уровня вакуума автоэмиссионного прибора, приводящее к возникновению электрического пробоя в межэлектродном пространстве и выходу прибора из строя. Проблема ионизации может быть решена напрямую созданием среды со сверхвысоким вакуумом в корпусе автоэмиссионного устройства. Применение ионных ловушек, т. е. дополнительных электродов под ненулевым потенциалом, которые будут перетягивать образующиеся положительные ионы на себя, может решить проблему ионной бомбардировки, однако конструкция устройства в этом случае усложнится [20]. Модификация формы катода для управления траекторией эмитированных электронов также является одним из возможных конструктивных подходов для снижения негативного влияния ионной бомбардировки [21]. Перспективное направление устранения ионизационных процессов – снижение межэлектродных расстояний до длины свободного пробега электрона в межэлектродной среде, что может значительно ослабить интенсивность ионной бомбардировки или полностью исключить ее. Для воздушной среды нормального атмосферного давления длина пробега будет составлять 67 нм [22]. Получение таких же или меньших межэлектродных расстояний в автоэмиссионных устройствах достижимо с учетом современного уровня технологии [23].

Известно, что процессу автоэлектронной эмиссии, как и любому другому процессу, связанному с протеканием тока в объеме твердого тела, будет сопутствовать явление Джоулева разогрева. Протекание токов большой плотности в автоэмиссионных структурах может приводить к их расплавлению, выгоранию или разрушению посредством взрыва. Теоретические и экспериментальные работы, однако, показывают, что разрушения термического характера происходят вследствие дополнительного разогрева автоэлектронных эмиттеров квантово-механическим эффектом Ноттинггама [24]. Сущность данного эффекта состоит в том, что в процессе эмиссии средняя энергия эмитированных электронов может отличаться от электронов, замещающих их. Это и обуславливает теплопоглощение или тепловыделение. В совокупности эффекты Джоуля и Ноттинггама приводят к более интенсивному перегреву вершины эмиттера в отличие от действия данных эффектов по отдельности. При достижении температуры инверсии, при которой энергия эмитированных электронов становится равной энергии приходящих электронов проводимости, нагрев эмиттера прекращается. При большем нагреве энергия ушедших электронов начинает превышать энергию электронов проводимости, при этом, соответственно, эмиттер начинает охлаждаться, а максимум температуры смещается от вершины в глубь тела эмиттера.

Существует также проблема, связанная с взрывным характером разрушений катодов. Исследования демонстрируют, что предел плотности автоэмиссионного тока для эмиттеров острейного типа, изготовленных из тугоплавких металлов, составляет порядка 10^7 А/см² при постоянном напряжении и может достигать 10^9 А/см² в случае наносекундного импульсного режима [14]. При достижении указанного предела плотности тока происходит взрывное разрушение катода, сопровождаемое пробоем вакуумного промежутка в межэлектродном пространстве. Взрывной характер разрушения эмиттеров в основном обусловлен наличием микровыступов на поверхности катодов, которые разрываются при быстром нагреве вследствие протекания автоэмиссионного тока высокой плотности [25].

Для решения проблем термического разрушения автоэмиссионных структур применяются тугоплавкие материалы, в первую очередь тугоплавкие металлы или карбиды металлов. Изготовление эмиттеров из материалов с большим коэффициентом теплопроводности (карбид кремния, алмаз) также является эффективным способом ослабления влияния тепловых эффектов. Менее очевидные способы борьбы с перегревом эмиттеров – это применение новых конструктивных подходов к снижению тепловыделения автоэмиссионных структур [26] и контроль протекаемого тока автоэлектронной эмиссии [27].

Протеканию автоэлектронной эмиссии в случае неидеально чистой поверхности эмиттера и неидеального вакуума будут сопутствовать адсорбция, десорбция и поверхностная миграция молекул остаточных газов. Данные процессы приводят к тому, что эффективная работа выхода электронов с поверхности автоэлектронного эмиттера не является постоянной. В ходе эмиссии токовые характеристики эмиттера могут изменяться в довольно широком диапазоне: изменение работы выхода на ~0,3 эВ приводит к изменению плотности тока автоэлектронной эмиссии в три раза [28, 29]. Влияние сорбционных и миграционных процессов может быть ослаблено предварительной очисткой поверхности эмиттера от слоя адсорбированных молекул и дальнейшим поддержанием чистоты эмиттера во время эксплуатации прибора методом подкалки. Однако использование нагрева в автоэмиссионном приборе лишает его важного преимущества – сниженной потребляемой мощности по сравнению с классическими термоэмиссионными устройствами – и требует усложнения конструкции прибора.

В условиях высокой напряженности поля и, соответственно, протекания автоэмиссионного тока высокой плотности может наблюдаться эффект перестройки поверхности вершины эмиттера. В результате саморазогрева протекающим током на поверхности запускается процесс миграции атомов, вследствие чего на вершине эмиттера возникают микровыступы и острые ребра стыков кристаллографических плоскостей [30]. В свою очередь, появление таких заострений на вершине эмиттера приводит к локальному усилению электрического поля, что может инициировать вакуумный пробой и разрушение эмиттера. Использование материалов с высоким коэффициентом теплопроводности и работа эмиттера в полях с некритической напряженностью позволят избежать возникновения эффекта поверхностной перестройки вершины.

Улучшение эксплуатационных характеристик автоэмиссионных устройств может быть достигнуто за счет подбора подходящего материала для изготовления эмиттера. Молибден выбран в качестве основного материала для автоэмиссионных триодов Спиндта, во-первых, по причине достаточно высокой технологической воспроизводимости, а во-вторых, ввиду высокой тугоплавкости и механической прочности. Однако молибден имеет небольшое значение работы выхода, равное 4,3 эВ, и молибденовые катоды нельзя нагревать до температуры 700 °С (такая температура необходима для полного удаления адсорбированных молекул остаточных газов с их поверхности по причине возникновения деформаций, вызываемых тепловыми напряжениями слоев в изготовленных триодных структурах).

С учетом технологии создания острых триодов Спиндта исследователи предпринимали попытки поиска оптимальных металлов для создания автоэмиссионных приборов [31–33]. Рассматривались различные варианты автоэмиссионных структур на основе тугоплавких металлов для устранения негативных эффектов тепловой природы. Расширенный перечень тугоплавких металлов включает в себя ниобий, молибден, тантал, вольфрам, рений, титан, ванадий, хром, цирконий, рутений, родий, гафний, осмий и иридий. Эти металлы имеют высокую температуру плавления (от 1670 до 3422 °С у титана и вольфрама соответственно), обладают стойкостью к механическим воздействиям и относительной химической инертностью. В работах последних лет триоды планарного типа создавали на основе тантала [34, 35], вольфрама [36, 37], золота [36, 38, 39], платины [36], алюминия [40]. Отметим, что применение металлов в качестве материала для автоэмиссионных структур исключает использование операции окисления, которая в случае полупроводников позволяет заострять эмитирующие иглы и кромки для получения сверхострых нанометровых скруглений вершин. Металлы также менее технологичны по сравнению с полупроводниками при рассмотрении процессов плазмохимического травления электродных слоев.

В настоящее время активно развиваются направления по созданию устройств на основе углеродных модификаций: углеродных нанотрубок, графена, наноалмазных пленок и т. п. Исследованиям автоэмиссионных свойств и разработкам таких устройств посвящено много работ [41–45]. Углеродные нанотрубки – перспективный материал для автоэмиссионных приборов: аномально высокий коэффициент усиления поля структур из углеродных нанотрубок, связанный с высоким аспектным отношением, позволяет получать автоэлектронную эмиссию при крайне низких электрических полях [44]. Углеродные нанотрубки имеют различные электронные свойства в зависимости от их хиральности (несимметричности сетки атомов) и атомарной структуры (нанотрубки могут быть одностенными или многостенными, открытыми или закрытыми). Еще одним важным для автоэмиссионной электроники свойством нанотрубок является малый разброс значений работы выхода по поверхности катода. Данный параметр составляет

несколько процентов от исходного значения при идеальном случае в диапазоне изменения давления от сверхвысокого вакуума до нормального атмосферного в отличие от металлических эмиттеров, работа выхода которых может изменяться на несколько десятков процентов [13]. Эмиттеры на основе синтезированных углеродных нанотрубок могут быть сформированы в различных конфигурациях: отдельные пучки нанотрубок с низкой плотностью по подложке, массивы пучков высокой плотности, пучки из хаотически ориентированных нанотрубок. В случае хаотически ориентированных массивов нанотрубок высокой плотности может возникать эффект электрической экранировки, при котором близко расположенные к рабочим электродам нанотрубки электростатически «затеняют» собой дальние и короткие. Неравномерное распределение токовой нагрузки по площади катода с плотным расположением нанотрубок может приводить к взрывным разрушениям отдельных сегментов структуры. При этом плазма из поврежденных волокон может способствовать закоротке активных эмиссионных центров катода и быстрому выхода его из строя [46]. В случае массивов пучков низкой плотности проблема неравномерности тока эмиссии отдельных пучков также будет проявляться. Поэтому необходимо, чтобы технология создания предусматривала высокую воспроизводимость волокон в составе пучка.

Исследуются возможности использования графена в качестве материала для автоэмиссионных приборов. Графен характеризуется высокой подвижностью электронов, которая на порядок превышает электронную подвижность кремния при температуре 300 К [47]. Среди преимуществ пленочного эмиттера на основе графена можно выделить: устойчивость к влиянию эффектов ионной бомбардировки и высокий коэффициент усиления поля, связанный с очень малым «радиусом скругления» кромки эмиттера с минимальной толщиной в один монослой графена [48]. Экспериментальные результаты исследования графеновых эмиттеров демонстрировали высокий коэффициент усиления поля и соответственно низкие пороговые напряжения [49, 50].

Предпринимались попытки снижения рабочих напряжений и повышения эмиссионной стабильности и долговечности автоэмиссионных структур с помощью различных покрытий эмиттера. Основные характеристики материалов-кандидатов в данном случае следующие: низкая работа выхода, высокая температура плавления, химическая инертность. В качестве материалов покрытий подходящими могут стать карбиды или бориды металлов, например карбид гафния [51], гексаборид лантана [52] или углеродные модификации типа графена [50] или алмаза [53]. В случае применения покрытий возникают такие проблемы, как степень адгезии материала покрытия, конформность наносимого слоя и нежелательное увеличение радиуса скругления вершины автоэлектронного эмиттера.

Изготовление автоэмиссионных структур, имеющих, с одной стороны, компактные размеры, а с другой – низкие рабочие напряжения, требует уменьшения межэлектродных расстояний до суб-100-нм диапазона. Для серийного производства автоэмиссионных устройств в этом случае может возникнуть проблема степени воспроизводимости массивов автоэмиссионных структур. Значительный разброс геометрических параметров, влияющий на получаемый автоэмиссионный ток, становится причиной выхода из строя отдельных элементов массива вследствие превышения критического значения плотности тока автоэмиссии. С точки зрения технологичности и воспроизводимости автоэмиссионных структур перспективно использование полупроводниковых материалов.

Вакуумная наноэлектроника на основе полупроводниковых структур. Важной задачей автоэмиссионной электроники является оптимизация эмиссионных и эксплуатационных параметров приборов. В качестве рабочих материалов для автоэмиссионных

структур рассматриваются металлы, углеродные модификации, полупроводники. Последние характеризуются важными для автоэмиссионной электроники особенностями:

- для полупроводниковых материалов разработана групповая технология формирования структур с высокой степенью воспроизводимости. Самой развитой в этом отношении до сих пор остается кремниевая КМОП-технология;

- КМОП-технология дает возможность комбинирования автоэмиссионных триодов и твердотельных полевых транзисторов на одной подложке, изготавливаемых в едином технологическом процессе;

- характеристиками автоэмиссионного процесса можно управлять с помощью изменения концентрации носителей заряда в объеме полупроводникового эмиттера (эффекты проникновения электрического поля, поверхностных состояний и т. п.).

На процесс автоэлектронной эмиссии оказывает существенное влияние следующая особенность полупроводниковых материалов. Известно, что число свободных электронов как в собственных, так и в легированных полупроводниках, которые применяются в микроэлектронике, на несколько порядков ниже, чем в металлах. Современный технологический маршрут создания КМОП-транзисторов включает в себя этап ионного легирования кремния для формирования активных областей транзистора, в которых концентрация примесей может составлять 10^{18} – 10^{20} см⁻³ [54]. Внешнее электрическое поле проникает в объем легированного полупроводника на глубину, обратно пропорциональную концентрации примеси в его приповерхностном слое [55]. Проникновение электрического поля приводит к изгибу энергетических зон полупроводника, что в случае автоэлектронных эмиттеров влияет на снижение пороговой напряженности поля для возникновения устойчивой автоэлектронной эмиссии. В случае кремниевых эмиттеров острейного типа со средней степенью легирования (10^{17} – 10^{18} см³) глубина проникновения электрического поля будет соизмерима с радиусом скругления вершины острия эмиттера (порядка нескольких нанометров).

Работы по созданию автоэмиссионных структур на основе кремния известны с середины 1970-х гг. [56]. Отечественные разработки автоэмиссионных микроприборов на основе кремниевых лезвийных и острейных триодных структур велись в 1980-х гг. в НИИФП им. Ф. В. Лукина и в настоящее время проводятся в МИЭТ [57]. Триодные структуры планировалось использовать в качестве источника электронов в матричных автоэмиссионных дисплеях и микрофокусных источниках рентгеновского излучения [58, 59]. На рис. 3, а, б представлены РЭМ-фотографии лезвийных и острейных автоэмиссионных катодно-сеточных узлов, изготовленных на основе кремния. Структуры получены в Центре коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.

Интерес к кремнию с точки зрения автоэмиссионной электроники объясняется несколькими причинами. Среди всех полупроводниковых материалов самым используемым в интегральной электронике остается кремний, так как кремниевая технология на сегодняшний день наиболее развита. Технологические процессы ионной имплантации и диффузионной загонки донорных или акцепторных примесей в объем кремниевых подложек не требуют больших энергий примесных ионов и дают возможность управления автоэлектронной эмиссией посредством генерации и инжекции носителей заряда в приповерхностную область эмиттера. Термическое окисление кремния в кислородной среде с добавлением паров воды позволяет получать эмиттеры лезвийного или острейного типа с чрезвычайно малыми радиусами скругления вершин (порядка единиц нанометров), что способствует снижению рабочих напряжений устройства за счет увеличения коэффициента усиления поля и эффекта проникновения поля в полупроводник [59].

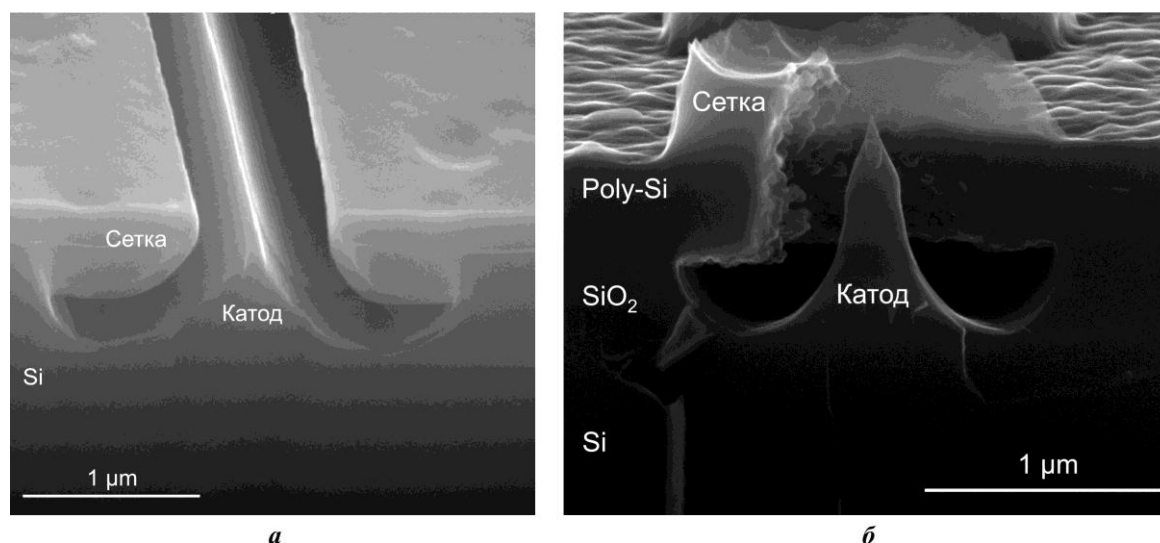


Рис. 3. РЭМ-изображения кремниевого катодно-сеточного узла автоэмиссионного триода лезвийного типа (а) и кремниевого катодно-сеточного узла автоэмиссионного триода острейного типа (б)

Fig. 3. SEM images of a silicon cathode-grid assembly of a blade-type field emission triode (a) and of a silicon cathode-grid assembly of a needle-type field emission triode (b)

Кремний имеет важное для автоэмиссионных структур в условиях отсутствия сверхвысокого вакуума свойство: образующийся на поверхности кремния слой собственного оксида SiO_2 толщиной приблизительно 2 нм [60] обеспечивает стабильность эмиссионных свойств катода в химически активной среде [57, 61]. Как показано в работе [62], собственный слой оксида кремния толщиной 3 нм позволил снизить рабочее напряжение пирамидальных вертикальных катодов до 10 В за счет уменьшения высоты барьера на границе полупроводник – диэлектрик. Следует отметить возможность совместного изготовления кремниевых автоэмиссионных и традиционных твердотельных приборов в едином технологическом процессе, что не является уникальной для кремния особенностью, а относится и к другим полупроводникам, например к карбиду кремния. Такие технологические возможности открывают перспективы создания гибридных полупроводниковых ИС, сочетающих в себе преимущества классических полевых транзисторов и автоэмиссионных приборов.

Активные разработки планарных автоэмиссионных структур на основе монокристаллического и поликристаллического кремния проводятся с конца 1990-х гг. [63, 64]. Несмотря на то что на тот момент максимальный уровень технологии составлял 150–180 нм, в 2000 г. удалось создать автоэмиссионный планарный диод на основе кремния с минимальным межэлектродным зазором 40 нм с помощью электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления. Изготовленный диод позволил получить ток эмиссии 1,4 мкА при напряжении 40 В на аноде. Результаты исследований изготовленных триодов демонстрируют, что максимальный ток эмиссии 0,35 мкА может быть получен при напряжениях 35 и 10 В на аноде и сетке соответственно. Крутизна передаточной характеристики триода оказалась равной 7,9 нСм, что, как указывают авторы, недостаточно для усиления высокочастотных сигналов. Для повышения крутизны передаточной характеристики предлагается уменьшать рабочие напряжения изготовленных триодов.

Дальнейшее развитие технология создания планарных автоэмиссионных приборов на основе кремния получила в исследованиях американской группы ученых из Центра нанотехнологий НАСА. В работе [65] представлены результаты исследований по соз-

данию наноразмерного автоэмиссионного триода, или, как его называли авторы, транзистора с наноразмерным вакуумным каналом и изолированным затвором. Разработанная структура представляет собой два симметричных кремниевых острия – катод и анод, расположенные на слое оксида кремния. Для изготовления устройств использовали пластины КНИ. Нижний слой кремния, отделенный оксидом, выполняет функцию управляющего электрода (аналог сетки). Межэлектродный промежуток формировали сушкой фоторезистивной маски, утонением перемычки до ее разрыва и последующим плазмохимическим травлением кремния по сформированной маске. Расстояние катод – анод в полученной структуре равно 150 нм. Максимальное значение тока автоэмиссии, полученное при работе разработанного устройства, составляет 40 мкА при напряжении на аноде и сетке 20 и 8 В соответственно. Крутизна передаточной характеристики триода достаточно высокая – 0,2 мкСм, частота отсечки, по оценкам авторов, составляет 0,46 ТГц при фиксированном напряжении на аноде и сетке 10 В.

Работа [66] научной группы Центра нанотехнологий НАСА посвящена разработке автоэмиссионного наноразмерного триода на основе кремния с трехмерной конструкцией сеточного электрода, в которой канал проводимости между катодом и анодом окружен со всех сторон сеткой. В публикации продемонстрированы экспериментальные результаты радиационных и температурных испытаний триодов. По приведенным данным, разработанные кремниевые триоды способны выдержать облучение протонами и гамма-квантами вплоть до доз 10 и 100 крад соответственно без заметного изменения порогового напряжения и максимального тока автоэмиссии.

В качестве полупроводникового материала для создания автоэмиссионных приборов может использоваться не только монокристаллический или поликристаллический кремний. Уникальные свойства карбида кремния дают все основания для рассмотрения этого полупроводника в качестве рабочего материала для устройств автоэмиссионной электроники. Теплопроводность карбида кремния превышает теплопроводность кремния более чем втрое, что может оказать положительное влияние на отвод тепла, выделяемого в процессе работы прибора. Карбид кремния имеет температуру плавления 2830 °С, высокую пробивную напряженность поля и высокую механическую прочность (энергия ковалентной связи между атомами карбида кремния почти втрое превышает таковую у кремния) [67, 68]. Дополнительное преимущество карбида кремния – эффект образования оксидной пленки при контакте с воздухом, пассивирующую открытую поверхность эмиттера [69].

В работе [70] научной группы Центра нанотехнологий НАСА сообщается о создании автоэмиссионного триода цилиндрической конструкции на основе карбида кремния. Приборный слой устройства формировали после эпитаксиального выращивания области *n*-типа проводимости с концентрацией 10^{19} см^{-3} и толщиной 5 мкм на поверхности карбидокремниевой пластины. Конструкция устройства представляет собой полый цилиндр, дно которого служит эмиттером, а средний и верхний слои, разделенные изолятором, являются сеткой и анодом. Как указывают авторы, выбор карбида кремния в качестве материала для автоэмиссионных структур обусловлен большей энергией разрыва связи карбида кремния по сравнению с монокристаллическим кремнием, что повышает стойкость эмиттеров из карбида кремния к катодному распылению при ионной бомбардировке. Кроме того, авторы обращают внимание на более высокую стойкость транзисторов на основе карбида кремния к воздействию высоких температур и ионизирующего излучения. Изготовленные приборы характеризуются сравнительно небольшим пороговым напряжением (около 5 В) и высокой стабильностью протекания автоэлектронной эмиссии в течение 24 ч работы. В отличие от диодов на основе карби-

докремниевых нанопроволок, изготовленных научной группой Лиу, триоды Центра нанотехнологий НАСА создавались стандартными методами интегральной технологии на 150-мм карбидокремниевых пластинах, что при условии дополнительных технологических отработок отдельных операций позволит запустить серийный выпуск разработанных триодов.

Перспективными являются разработки автоэмиссионных устройств на основе алмаза. Алмаз относится к широкозонным полупроводникам, ширина его запрещенной зоны составляет 5,47 эВ. Жидкая фаза углерода существует только при крайне высоких давлениях, а при температуре около 4000 °С и нормальном атмосферном давлении происходит его сублимация [71]. Алмаз обладает исключительной электронной и дырочной проводимостью, а теплопроводность алмазных CVD-слоев может достигать 22 Вт/(см·К), что почти в шесть раз больше, чем у карбида кремния. При этом алмаз химически инертен при температурах ниже нескольких сотен градусов Цельсия [68].

С середины 2000-х до начала 2010-х гг. предпринимались попытки создания планарных автоэмиссионных приборов на основе пленок нанокристаллического алмаза [72, 73]. Наноалмазный слой формировали методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на пластины КНИ, электроды приборов изготавливали реактивным ионным травлением осажденного слоя и приборного слоя кремния. Катод прибора представляет собой «гребенку» из нескольких заостренных наноалмазных эмиттеров с высоким аспектным отношением. Расстояние катод – анод варьировали в пределах 2–10 мкм. При относительно малой крутизне ВАХ (22 нСм) и высоких управляющих напряжениях (65–410 В) созданные приборы позволили получить максимальный ток эмиссии 0,3 мкА и продемонстрировали коэффициент усиления по напряжению порядка 200. Изготовленные триоды подвергали радиационному воздействию в ходе экспериментальных измерений, результаты которых показали отсутствие заметного влияния накопленной дозы 20 Мрад на ВАХ триода.

Авторы работ [74, 75] исследовали характеристики логического вентиля функции ИЛИ, созданного на основе наноалмазных автоэмиссионных диодов. Технологический процесс создания структур аналогичен созданию приборов на основе пленок нанокристаллического алмаза. Элемент состоит из двух автоэмиссионных диодов, представляющих собой структуру из множества (до 9360 единиц) наноалмазных многоострижных элементов, которые окружены со всех сторон кромками наноалмазного слоя (катод и анод). Межэлектродное расстояние в структурах равно 4 мкм. Характеристики изготовленных приборов снимали в вакуумной камере при давлении 10^{-7} торр. Диоды продемонстрировали высокое значение автоэмиссионного тока, равное 87 мкА, при напряжении на аноде 12,5 В. Токовые флуктуации составляли 2 % при значении тока 8,5 мкА на протяжении 2 ч проведения экспериментальных исследований. Для проверки функциональной работоспособности устройства на анод подавали импульсный сигнал прямоугольной формы, равный 2,2 В. Результаты проверки функции ИЛИ показали корректность работы разработанного устройства, однако наблюдалась разница в уровнях напряжения на входе и выходе устройства, составляющая 1 В. Авторы отмечают, что улучшение характеристик разработанных устройств может быть достигнуто уменьшением межэлектродных расстояний диодов до субмикронных значений с помощью электронно-лучевой литографии.

Технология изготовления автоэмиссионных триодов острейного типа на основе наноалмазных пленок рассматривается в публикациях [76–78]. Процесс изготовления массива автоэмиссионных триодов и результаты измерений полученных образцов приведены соответственно в публикациях 2017 г. В приборном слое пластины КНИ вы-

травливали конусообразную полость, далее проводили операцию окисления пластины до смыкания вершины конуса. Наноалмазные острия формировали из азотсодержащего нанокристаллического алмазного слоя методом плазмохимического осаждения из газовой фазы в полости на поверхности пластины. После этого молибденовую пластину припаивали к лицевой стороне пластины КНИ с осажденным слоем нанокристаллического алмаза, при этом приборный слой кремния и слой скрытого оксида полностью стравливали с полученной структуры. Катодно-сеточную изоляцию формировали из оставшегося слоя оксида кремния, верхний слой кремния использовали в качестве сеточного электрода. На пластине сформированы два массива триодов: два анода из сильнолегированного кремния *n*-типа фиксировали на высоте 4 и 25 мкм над массивами наноалмазных эмиттеров с помощью спейсеров из оксида кремния и нитрида алюминия соответственно. Передаточная ВАХ наноалмазных триодов, полученная в режиме постоянного тока, показала высокое значение крутизны, равное 37 мкСм. Усилительные свойства изготовленных триодов исследовали в режиме переменного тока. Коэффициент усиления по напряжению триодов определяли при подаче переменного сигнала с частотой 100 Гц и амплитудой приблизительно 2–3 В на сеточный электрод триода. Коэффициент усиления по напряжению равен 3,8 для образцов с расстоянием катод – анод 25 мкм и 1,84 для образцов с расстоянием катод – анод 4 мкм. Частота отсечки у изготовленных приборов составляет доли мегагерц, что, по мнению авторов, связано с недостаточно высокой крутизной ВАХ и большой емкостью катод – сетка.

Подходящим материалом для создания приборов автоэмиссионной наноэлектроники может стать нитрид галлия. По состоянию на 2023 г. нитрид галлия остается перспективным и востребованным материалом для силовой и высокочастотной микроэлектроники. Он имеет необходимые для эмиссионной электроники характеристики: ширина запрещенной зоны 3,39 эВ, достаточно высокая температура плавления, равная 2276 °С, высокая химическая стойкость и механическая прочность. Работы последних лет демонстрируют морфологическое многообразие автоэмиссионных структур из нитрида галлия [79]. Пример успешной реализации триодов на основе острий из нитрида галлия представлен в работе [80]. Острия изготавливали химическим травлением сильнолегированного слоя нитрида галлия по специальной технологии, разработанной авторами публикации. Сеточные электроды прибора формировали напылением и последующим реактивным ионным травлением слоя хрома. В результате проведения технологического процесса изготовлен массив из 10 тыс. нитридгаллиевых триодов. Полученная плотность тока эмиссии с массива триодов достигала 150 мА/см². Как указывают авторы, им удалось снизить напряжение включения триодов (напряжение, необходимое для получения тока 1 пА) до 20 В по сравнению с предыдущими результатами за счет уменьшения радиуса скругления острий с 40 до 20 нм.

Проведены работы по интеграции кремниевых автоэмиссионных устройств и полевых транзисторов в едином технологическом процессе. Научная группа Центра нанотехнологий НАСА в 2014 г. представила результаты разработки устройства, сочетающего в себе стандартный полевой КМОП-транзистор и автоэмиссионный кремниевый триод планарного типа на одной подложке [81]. Твердотельный транзистор и эмиссионный триод изготовлены в едином технологическом процессе. Метод формирования канала проводимости автоэмиссионного триода и полевого транзистора предложен в 2012 г. [65]. Канал формировали сушкой фоторезистивной маски и утонением перемычки канала. Экспериментальная проверка функционирования устройств показала корректную работу и приемлемые рабочие характеристики как эмиссионного, так и твердотельного приборов. Для ослабления влияния процессов ионной бомбардировки

на работу автоэмиссионного триода в воздушной среде управляющее напряжение сетки не превышало 10 В.

Пример интеграции автоэмиссионного триода с полевым транзистором для улучшения контроля за протеканием тока предложен в публикации [82]. Прототипированный прибор представляет собой автоэмиссионный острейный триод и полевой транзистор, совмещенные в одной структуре на подложке кремния p -типа, причем катод триода является стоком транзистора. Данное решение позволило значительно повысить стабильность тока эмиссии на уровне 3 мкА, снизив токовые флуктуации с нескольких десятков процентов до нескольких единиц. Аналогичный способ повышения стабильности тока автоэлектронной эмиссии диода на основе хаотически ориентированных наноразмерных игл оксида цинка (ZnO) с помощью управляющего полевого транзистора предложен в работе [83]. На кремниевой подложке p -типа формировали области n^+ -типа проводимости, которые при работе прибора выполняли функции стока и истока транзистора. Результаты проверки работы изготовленного прибора показали снижение токовых флуктуаций с 61 до 3 % на уровне 650 нА.

Научная группа Университета Чжуншань им. Сунь Ятсена (Китай) для создания дополнительного механизма ограничения и контроля тока автоэлектронной эмиссии в едином технологическом маршруте изготовила массив автоэмиссионных триодов острейного типа на основе кремния совместно с полевыми транзисторами, встроенными в тело эмиттера. Изготовленные триоды, управляемые полевыми транзисторами, продемонстрировали малые флуктуации автоэмиссионного тока $\sim 5\%$ и высокую управляемость ВАХ, равную 0,4 пА/мВ, при напряжении на сетке 53 В [84].

Перспективы развития вакуумной нанoeлектроники на основе полупроводников. Вакуум как среда распространения носителей заряда по сравнению с твердым телом имеет следующую особенность. Электроны, пересекающие вакуумный канал, не соударяются с узлами кристаллической решетки, как в случае движения в объеме твердого тела. В свою очередь, устранение эффекта рассеяния электронов на решетке кристалла позволяет автоэмиссионным устройствам функционировать в гигагерцовом или даже терагерцовом диапазоне частот.

Для автоэмиссионных устройств, принцип работы которых основан на взаимодействии поверхности эмиттера и электромагнитной волны, частотное ограничение будет связано со временем туннелирования электрона через потенциальный барьер. Оценки этой величины дают значение $\sim 10^{-15}$ с. Частотный предел функционирования прибора в таком случае составляет $\sim 10^{14}$ Гц [14]. Если ограничение быстродействия определяется для усилительного автоэмиссионного прибора, использующего перенос электронов в вакуумном канале (например, для триода), предельная частота определяется временем пролета электронов от катода к аноду устройства [85]:

$$\begin{aligned}\tau_{\text{к-а}} &= \tau_{\text{к-с}} + \tau_{\text{с-а}}, \\ \tau_{\text{к-с}} &= \sqrt{\frac{2m}{eU_c}} d_{\text{к-с}}, \\ \tau_{\text{с-а}} &= \sqrt{\frac{2m}{e}} \frac{d_{\text{с-а}}}{\sqrt{U_c} + \sqrt{U_a}},\end{aligned}$$

где $\tau_{\text{к-с}}$ и $\tau_{\text{с-а}}$ – время пролета электроном межэлектродного пространства катод – сетка и сетка – анод соответственно; m – масса покоя электрона; e – заряд электрона; U_c – потенциал сетки; $d_{\text{к-с}}$ – межэлектродное расстояние катод – сетка; $d_{\text{с-а}}$ – межэлектродное расстояние сетка – анод; U_a – потенциал анода.

Однако в реальных автоэмиссионных приборах граничная частота определяется не только времяпролетными характеристиками устройства (которые устанавливают границу работы устройств с суб-100-нм проектными нормами в терагерцовом диапазоне), но и временем, затрачиваемым на перезарядку межэлектродных емкостей. Частота отсечки для автоэмиссионного триода в таком случае определяется как

$$f_t = g_m / 2\pi C_{c-k}, \quad (2)$$

где $g_m = \partial I_a / \partial U_c$ – крутизна передаточной ВАХ, определяемая как отношение изменения выходного тока анода I_a к вызвавшему его изменению управляющего напряжения на сетке U_c ; C_{c-k} – электрическая емкость между сеткой и катодом.

Оценки показывают, что в реальных автоэмиссионных приборах ограничение быстродействия по крутизне передаточной характеристики вступает в силу раньше, чем времяпролетное ограничение.

Авторами настоящей статьи предпринято оценочное моделирование ВАХ и параметров быстродействия двух типов автоэмиссионных триодов: лезвийного и планарного типа в среде мультифизического конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics. На рис. 4 приведено изображение созданных конструкций триодов, которые использовались при проведении конечно-элементного моделирования. Модели триодов создавали с учетом реально достижимых в современном КМОП-процессе технологических норм. Критическая для достижения максимального тока автоэмиссии величина апертуры сетки (двойное расстояние катод – сетка) при моделировании варьировали в диапазоне 15–45 нм. Радиус скругления вершины катода фиксировали на значении 2 нм, расстояние катод – анод равно 100 нм, длина катода в случае лезвийного триода и высота в случае планарного триода равна 500 нм.

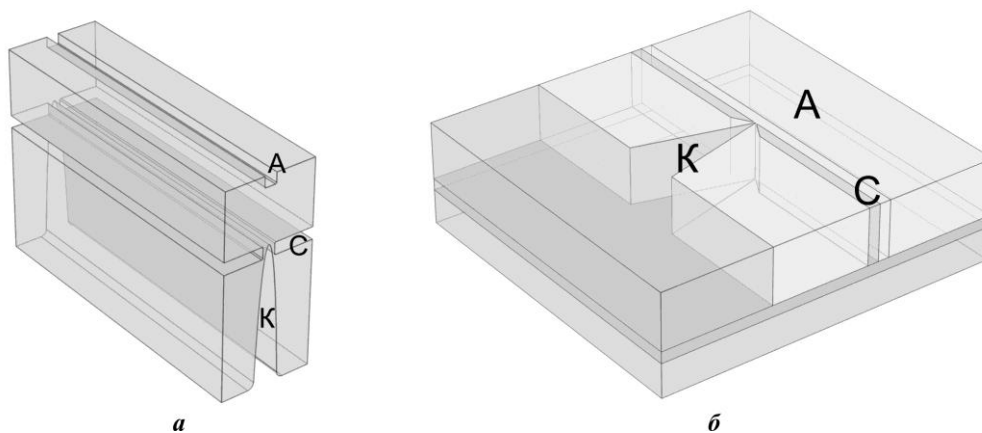


Рис. 4. Трехмерные конечно-элементные модели триодов лезвийного типа (а) и планарного типа (б): А – анод; С – сетка; К – катод

Fig. 4. 3D finite element models of a blade-type triode (a) and planar triode (b): A – anode; C – grid; K – cathode

Расчет распределения напряженности электрического поля на поверхности катода в данных моделях проводили средствами стандартного физического модуля COMSOL Multiphysics для моделирования электростатических явлений. Полученные распределения напряженности поля затем использовали для расчета распределений плотности тока автоэлектронной эмиссии. Для вычисления плотности тока применяли уравнение автоэлектронной эмиссии для металлических поверхностей в форме записи (1). Работу выхода материала принимали равной 4 эВ. При проведении оценочного моделирования

не учитывали дополнительные эффекты для полупроводникового материала: концентрацию носителей в приповерхностной области катода, проникновение электрического поля и т. д.

Результаты моделирования передаточных ВАХ и частоты отсечки в зависимости от расстояния катод – сетка для лезвийного и планарного триодов приведены на рис. 5.

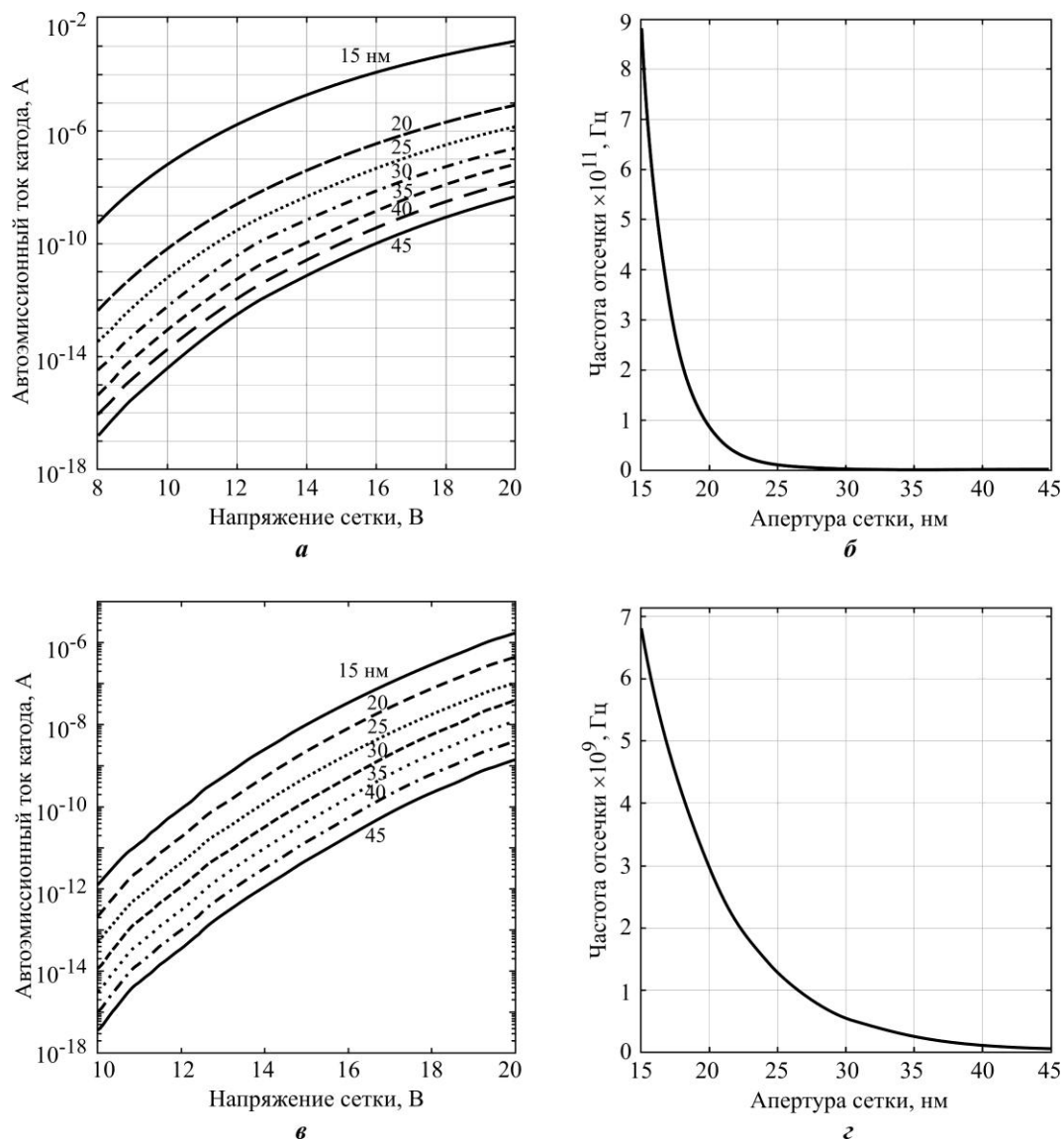


Рис. 5. Семейство передаточных ВАХ автоэмиссионного триода лезвийного типа при вариации апертуры сетки (а) и зависимость частоты отсечки автоэмиссионного триода лезвийного типа от апертуры сетки (б), семейство передаточных ВАХ автоэмиссионного триода планарного типа при вариации апертуры сетки (в) и зависимость частоты отсечки автоэмиссионного триода планарного типа от апертуры сетки (г)

Fig. 5. Cathode current vs. grid voltage characteristics of a blade-type field emission triode with a variation of the grid aperture (a) and cut-off frequency of a blade-type field emission triode as a function of the grid aperture (b), cathode current vs. grid voltage characteristics of a planar field emission triode with a variation of the grid aperture (c) and cut-off frequency of a planar field emission triode as a function of the grid aperture (d)

Полученные значения распределения плотности тока автоэмиссии по поверхности катода при максимальных значениях напряжения на аноде и сетке показали, что критическое значение плотности тока 10^6 А/см², приводящее к разрушению катода, не превышено [86]. Расчет частоты отсечки триодов проводили по формуле (2) на основе расчетной крутизны передаточной ВАХ и емкости катод – сетка. Результаты моделирования демонстрируют, что конструкция триода лезвийного типа предпочтительна с точки зрения управляемости ВАХ, при этом максимальная частота отсечки в триоде такого типа более чем на два порядка выше частоты отсечки планарного триода. Предельная частота отсечки триода лезвийного типа при достижении расстояния катод – сетка 15 нм составляет порядка нескольких сотен гигагерц. При этом частота отсечки, согласно приведенной зависимости, будет резко падать при увеличении апертуры сетки. Дополнительным преимуществом конфигурации лезвийного типа перед триодами с катодами в виде острий является повышенная стойкость к разрушениям термического характера, так как выделяемое на лезвии в процессе эмиссии тепло будет распределяться по большей площади в отличие от катода в виде острия. С точки зрения технологической интеграции триоды планарного типа предпочтительнее лезвийных триодов, так как технологический процесс изготовления последних требует использования операций создания вертикальных структур.

В настоящее время не существует коммерчески успешных решений автоэмиссионных устройств в форме интегральных микросхем. В качестве примера вакуумной интегральной схемы, которая выпускалась малыми пробными партиями, можно привести электронную систему матричного автоэмиссионного дисплея. В научно-технической литературе описание первого варианта конструкции дисплея такого типа появилось в 1970 г. [87]. Автоэмиссионные матричные дисплеи по принципу действия близки к электронно-лучевым трубкам: дисплей имеет экран, покрытый люминофором, светящимся в результате падения на него пучка ускоренных электронов, источником которых является матрица автоэмиссионных структур. Первый прототип монохромного автоэмиссионного дисплея был представлен разработчиками из французского исследовательского центра CEA-Leti в 1986 г. на конференции по проблемам дисплейных технологий [88]. В начале 2000-х гг. фирмы PixTech (Франция), Futaba (Япония) и Micron Technology (США) выпускали цветные матричные автоэмиссионные дисплеи малыми партиями. Именно активная разработка матричных автоэмиссионных дисплеев обусловила повышенный интерес к автоэмиссионным разработкам спустя двадцать лет после публикаций Спиндта. Коммерциализация технологии автоэмиссионных матричных дисплеев не воплотилась в жизнь, и разработки были заморожены к концу 2000-х гг. Разработчики автоэмиссионных дисплеев столкнулись с множеством проблем технологического и эксплуатационного характера, к тому же к концу 2000-х гг. уже активно развивались LCD- и OLED-дисплеи, которые оказались более надежными и дешевыми в производстве устройствами [89].

Современный уровень развития нанотехнологии [81–84] позволяет создавать автоэмиссионные устройства на основе кремния в едином технологическом цикле со стандартными КМОП-транзисторами, что открывает возможности создания гибридных вакуумно-твердотельных ИС на основе полупроводников. Важное преимущество снижения технологических норм – эффект уменьшения вероятности возникновения ударной ионизации для всех типов газов, содержащихся в воздухе, за счет уменьшения длины канала проводимости прибора по крайней мере до 65 нм и падения рабочего напряжения до 12 В [22, 67]. Это означает, что эмиссия электронов в устройстве может осуществляться в воздушной среде при нормальном атмосферном давлении.

Задача создания стойкой быстродействующей элементной базы вакуумной наноэлектроники и внедрения ее в цикл разработки вакуумных ИС может быть решена с помощью полупроводниковой технологии. В таблице представлена информация по основным термическим и электрическим свойствам полупроводниковых материалов, используемых в микроэлектронике в настоящее время. Кремний как основной материал для изготовления автоэмиссионных структур имеет ряд важных преимуществ: нанометровый радиус скругления вершины эмиттера при использовании процесса окисления, повышенная стойкость к ионной бомбардировке, возможности интеграции эмиссионных устройств с твердотельными в едином технологическом процессе. При этом, однако, с точки зрения эксплуатационных характеристик кремний имеет средние физические параметры: невысокие температура плавления и коэффициент теплопроводности, относительно низкая механическая прочность. Карбид кремния и алмаз выгодно отличаются от кремния относительно стойкости к перегреву, электродному распылению и процессам адсорбции. Уже достаточно давно существует и развивается технология создания силовых карбидокремниевых MOSFET-транзисторов, достижения которой можно использовать при создании автоэмиссионных устройств. Текущий уровень технологии изготовления наноалмазных структур, по данным публикаций последних десяти лет, позволяет создавать автоэмиссионные приборы с приемлемыми рабочими напряжениями и достаточно высокой стабильностью тока эмиссии. Как показывают исследования фазового состава алмазных наноструктур, наличие графитовых фаз в структуре эмиттера улучшает его эмиссионные свойства. Добиться повышенного содержания графитовых фаз можно, изготавливая наноалмазные эмиттеры методом плазменного осаждения из газовых смесей, богатых инертными газами, либо методом ионной имплантации медью, железом или золотом [90]. Достаточно широко используемые в настоящее время нитрид галлия и арсенид галлия, несмотря на разработанную технологию, уступают рассмотренным полупроводникам прежде всего в термических свойствах: невысокая температура плавления и теплопроводность этих материалов затрудняют их использование в автоэмиссионных приборах.

**Свойства полупроводниковых материалов
для изготовления автоэмиссионных наноструктур [54, 68, 98, 99]
Properties of semiconductor materials
for the manufacture of field-emission nanostructures [54, 68, 98, 99]**

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Относительная диэлектрическая постоянная	Электрическое поле пробоя, МВ/см	Подвижность электронов, см ² /(В·с)	Теплопроводность, Вт/(см·К)	Температура плавления, К
Кремний	1,12	11,9	0,3	1500	1,5	1687
Арсенид галлия	1,43	12,5	0,4	5600	0,54	1511
Нитрид галлия	3,39	9,5	3,3	400	1,3	2550
Карбид кремния	3,20	10	3,5	500	4	3103
Нано-алмаз	5,47	5,7	10	4500	22	4300*

*Температура сублимации.

Наноразмерные автоэмиссионные структуры на основе полупроводниковых материалов можно применять и в приборах, не относящихся напрямую к элементной базе электроники. К их числу можно отнести портативный источник рентгеновского излучения [91], электронную систему для рентгеновской литографии [59], миниатюрный масс-спектрометр [92], осветительную люминесцентную лампу [93], датчик давления [94], нейтрализатор заряда в ионных двигателях [95], дезинфицирующую ультрафиолетовую лампу [96], датчик Холла [97]. Так же как и в случае с разработкой элементной базы вакуумной наноэлектроники, основной проблемой автоэмиссионных структур в устройствах становится стабильность работы и срок эксплуатации. Уникальные свойства полупроводниковых материалов могут быть полезны для решения обозначенных проблем.

Заключение. Проведенный обзор публикаций показал, что автоэмиссионная электроника – актуальный предмет исследований, имеющий перспективы создания защищенной быстродействующей элементной базы нового типа. ИС на основе полупроводниковых автоэмиссионных структур могут найти свое применение в разработке электронных устройств для различных областей техники, но для широкого внедрения автоэмиссионной электроники необходимо решить ряд проблем прикладного характера.

Использование полупроводниковых материалов – карбида кремния или наноструктурированного алмаза – при изготовлении автоэмиссионных наноструктур потенциально может значительно улучшить эксплуатационные характеристики разрабатываемых автоэмиссионных приборов. Групповые технологические процессы наноэлектроники предоставляют широкие возможности создания гибридных устройств, сочетающих в себе вакуумные и твердотельные элементы на одной подложке. Основной задачей в данном случае станет отработка технологических процессов формирования автоэмиссионных наноразмерных структур на основе рассмотренных полупроводников. Создание автоэмиссионных устройств с возможностью работы в диапазоне частот вплоть до нескольких сотен гигагерц невозможно без получения значительных токов эмиссии при малых рабочих напряжениях. Перспективным вариантом достижения максимальной крутизны передаточной ВАХ, а следовательно, и максимальных рабочих частот может стать использование автоэмиссионных наноразмерных триодов с вертикальным расположением электродов и катодом в форме лезвия.

Литература

1. **Fowler R. H., Nordheim L.** Electron emission in intense electric fields // Proc. R. Soc. Lond. A. 1928. Vol. 119. Iss. 781. P. 173–181. <https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0091>
2. **Nordheim L.** Zur Elektronentheorie der Metalle. I // Ann. Phys. 1931. Vol. 401. Iss. 5. P. 607–640. <https://doi.org/10.1002/andp.19314010507>
3. **Forbes R. G.** Comments on the continuing widespread and unnecessary use of a defective emission equation in field emission related literature // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. Iss. 21. Art. No. 210901. <https://doi.org/10.1063/1.5117289>
4. **Márquez-Mijares M., Lepetit B.** A three dimensional numerical quantum mechanical model of field electron emission from metallic surfaces covered with carbon adsorbates // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. Iss. 6. Art. No. 065107. <https://doi.org/10.1063/1.5094238>
5. **Forbes R. G.** Renewing the mainstream theory of field and thermal electron emission // Modern Developments in Vacuum Electron Sources / eds G. Gaertner, W. Knapp, R. G. Forbes. Cham: Springer, 2020. P. 387–447. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7_9
6. **Forbes R. G.** 21st century planar field emission theory and its role in vacuum breakdown science // 2020 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Padova: IEEE, 2021. P. 3–10. <https://doi.org/10.1109/ISDEIV46977.2021.9587119>

7. **Jensen K. L.** A tutorial on electron sources // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018. Vol. 46. No. 6. P. 1881–1899. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2782485>
8. **Jensen K. L.** A reformulated general thermal-field emission equation // *Journal of Applied Physics*. 2019. Vol. 126. Iss. 6. Art. No. 065302. <https://doi.org/10.1063/1.5109676>
9. **Lepetit B.** Electronic field emission models beyond the Fowler – Nordheim one // *Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 122. Iss. 21. Art. No. 215105. <https://doi.org/10.1063/1.5009064>
10. **Lepetit B.** A quantum mechanical model of electron field emission from two dimensional materials. Application to graphene // *Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 129. Iss. 14. Art. No. 144302. <https://doi.org/10.1063/5.0047771>
11. **Kyritsakis A., Djurabekova F.** A general computational method for electron emission and thermal effects in field emitting nanotips // *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 128. P. 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.11.010>
12. **Kyritsakis A., Veske M., Djurabekova F.** General scaling laws of space charge effects in field emission // *New J. Phys.* 2021. Vol. 23. No. 6. Art. No. 063003. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/abffa8>
13. **Егоров Н. В., Шешин Е. П.** Автоэлектронная эмиссия: Принципы и приборы. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 703 с.
14. **Фурцев Г. Н.** Автоэлектронная эмиссия. СПб.: Лань, 2012. 319 с.
15. **Buck D. A., Shoulders K. R.** An approach to microminiature printed systems // *Papers and Discussions Presented at the Dec. 3–5, 1958, Eastern Joint Computer Conference: Modern Computers: Objectives, Designs, Applications (AIEE-ACM-IRE '58 (Eastern))*. New York: ACM Press, 1958. P. 55–59. <https://doi.org/10.1145/1458043.1458057>
16. **Shoulders K. R.** Microelectronics using electron-beam-activated machining techniques // *Advances in Computers*. 1961. Vol. 2. P. 135–293. [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(08\)60142-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(08)60142-4)
17. **Spindt C. A., Shoulders K. R.** Research in micron-size field-emission tubes // *IEEE 1966 8th Conference on Tube Techniques*. New York: IEEE, 1966. P. 143.
18. **Spindt C. A.** A thin-film field-emission cathode // *Journal of Applied Physics*. 1968. Vol. 39. Iss. 7. P. 3504–3505. <https://doi.org/10.1063/1.1656810>
19. **Spindt C. A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E. R.** Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones // *Journal of Applied Physics*. 1976. Vol. 47. Iss. 12. P. 5248–5263. <https://doi.org/10.1063/1.322600>
20. А. с. 107388 СССР. Способ уменьшения ионной бомбардировки эмитирующих электроны металлических острий / **М. И. Елинсон, Г. Ф. Васильев**; заявл. 24.09.1955; опубл. 10.09.1957.
21. Пат. 2044363 РФ. Устройство с автоэлектронной эмиссией (его варианты) / **Н. А. Дюжеев, А. Б. Ишкарин**; заявл. 08.07.1994; опубл. 20.09.1995.
22. **Jennings S. G.** The mean free path in air // *Journal of Aerosol Science*. 1988. Vol. 19. Iss. 2. P. 159–166. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(88\)90219-4](https://doi.org/10.1016/0021-8502(88)90219-4)
23. Electron emission devices for energy-efficient systems / **S. Nirantar, T. Ahmed, M. Bhaskaran et al.** // *Adv. Intell. Syst.* 2019. Vol. 1. Iss. 4. Art. ID: 1900039. <https://doi.org/10.1002/aisy.201900039>
24. **Nottingham W. B.** Remarks on energy losses attending thermionic emission of electrons from metals // *Phys. Rev.* 1941. Vol. 59. Iss. 11. P. 906. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.59.906.2>
25. **Месяц Г. А.** Взрывная электронная эмиссия. М.: Физматлит, 2011. 280 с.
26. Self-modulated field electron emitter: Gated device of integrated Si tip-on-nano-channel / **Z. Huang, Y. Huang, Z. Pan et al.** // *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 109. Iss. 23. Art. No. 233501. <https://doi.org/10.1063/1.4971336>
27. **Guerrera S. A., Akinwande A. I.** Nanofabrication of arrays of silicon field emitters with vertical silicon nanowire current limiters and self-aligned gates // *Nanotechnology*. 2016. Vol. 27. No. 29. Art. No. 295302. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/29/295302>
28. **Kolosko A. G., Popov E. O., Filippov S. V.** Analysis of the behavior of individual emission sites on the surface of a multi-tip field cathode // *Tech. Phys. Lett.* 2019. Vol. 45. Iss. 3. P. 304–307. <https://doi.org/10.1134/S1063785019030283>
29. *Ab initio* calculation of field emission from metal surfaces with atomic-scale defects / **H. Toijala, K. Eimre, A. Kyritsakis et al.** // *Phys. Rev. B*. 2019. Vol. 100. Iss. 16. Art. ID: 165421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.165421>
30. **Fujita S., Shimoyama H.** Mechanism of surface-tension reduction by electric-field application: Shape changes in single-crystal field emitters under thermal-field treatment // *Phys. Rev. B*. 2007. Vol. 75. Iss. 23. Art. ID: 235431. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.235431>

31. Double-gated, Spindt-type field emitter with improved electron beam extraction / **Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa et al.** // IEEE Transactions on Electron Devices. 2016. Vol. 63. No. 5. P. 2182–2189. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2545710>
32. **Nagao M., Gotoh Y., Neo Y., Mimura H.** Beam profile measurement of volcano-structured double-gate Spindt-type field emitter arrays // J. Vac. Sci. Technol. B. 2016. Vol. 34. Iss. 2. Art. ID: 02G108. <https://doi.org/10.1116/1.4944453>
33. **Deka N., Subramanian V.** On-chip fully integrated field emission arrays for high-voltage MEMS applications // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. Vol. 67. No. 9. P. 3753–3760. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3006167>
34. **Chang W.-T., Chuang T.-Y., Su Ch.-W.** Metal-based asymmetric field emission diodes operated in the air // Microelectronic Engineering. 2020. Vol. 232. Art. No. 111418. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111418>
35. **Chang W.-T., Cheng M.-Ch., Chuang T.-Y., Tsai M.-Y.** Field emission air-channel devices as a voltage adder // Nanomaterials. 2020. Vol. 10. Iss. 12. Art. No. 2378. <https://doi.org/10.3390/nano10122378>
36. Metal–air transistors: Semiconductor-free field-emission air-channel nanoelectronics / **S. Nirantar, T. Ahmed, G. Ren et al.** // Nano Lett. 2018. Vol. 18. No. 12. P. 7478–7484. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b02849>
37. **De Rose L. B., Scherer A., Jones W. M.** Suspended nanoscale field emitter devices for high-temperature operation // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. Vol. 67. No. 11. P. 5125–5131. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3019765>
38. Nanoscale vacuum channel transistor with in-plane collection structure / **J. Xu, H. Hu, W. Yang et al.** // Nanotechnology. 2020. Vol. 31. No. 6. Art. No. 065202. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab51cb>
39. Optimization of a field emission electron source based on nano-vacuum channel structures / **J. Xu, C. Lin, Y. Shi et al.** // Micromachines. 2022. Vol. 13. Iss. 8. Art. No. 1274. <https://doi.org/10.3390/mi13081274>
40. **Srisonphan S.** Field effect-controlled space-charge limited emission triode with nanogap channels // IEEE Electron Device Letters. 2021. Vol. 42. No. 10. P. 1540–1543. <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3103557>
41. Field emission from carbon nanostructures / **F. Giubileo, A. Di Bartolomeo, L. Iemmo et al.** // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Iss. 4. Art. No. 526. <https://doi.org/10.3390/app8040526>
42. Comparison of field emission performances and durability of three nanocarbon materials / **M.-J. Youh, C.-S. Lin, N.-W. Pu et al.** // Vacuum. 2020. Vol. 177. Art. ID: 109382. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109382>
43. Углеродные материалы для автоэмиссионных приборов на их основе / **З. Я. Левин, Е. П. Шешин, Н. Ч. Чжо и др.** // Труды МФТИ. 2018. Т. 10. № 2 (38). С. 30–46. EDN: XTWBON.
44. **Шестеркин В. И.** Эмиссионно-эксплуатационные характеристики различных типов автоэмиссионных катодов // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 1. С. 3–30. <https://doi.org/10.31857/S0033849420010040>. – EDN: FFULEM.
45. The rise of carbon materials for field emission / **N. Dwivedi, Ch. Dhand, J. D. Carey et al.** // J. Mater. Chem. C. 2021. Vol. 9. Iss. 8. P. 2620–2659. <https://doi.org/10.1039/D0TC05873D>
46. **Елецкий А.В.** Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897–930. EDN: MTVUHF.
47. Electric field effect in atomically thin carbon films / **K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov et al.** // Science. 2004. Vol. 306. Iss. 5696. P. 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
48. **Егоров Н. В., Шешин Е. П.** Современное состояние автоэмиссионной электроники // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 3. С. 5–15. <https://doi.org/10.7868/S0207352817030088>. – EDN: YIVPRJ.
49. Field electron emission characteristics and physical mechanism of individual single-layer graphene / **Z. Xiao, J. She, S. Deng et al.** // ACS Nano. 2010. Vol. 4. Iss. 11. P. 6332–6336. <https://doi.org/10.1021/nn101719r>
50. **Shao X., Srinivasan A., Ang W. K., Khurshed A.** A high-brightness large-diameter graphene coated point cathode field emission electron source // Nat. Commun. 2018. Vol. 9. Art. No. 1288. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03721-y>
51. Fabrication and characterization of HfC coated Si field emitter arrays / **T. Sato, S. Yamamoto, M. Nagao et al.** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2003. Vol. 21. Iss. 4. P. 1589–1593. <https://doi.org/10.1116/1.1569933>
52. Enhanced field emission from lanthanum hexaboride coated multiwalled carbon nanotubes: Correlation with physical properties / **R. Patra, S. Ghosh, E. Sheremet et al.** // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116. Iss. 16. Art. No. 164309. <https://doi.org/10.1063/1.4898352>

53. Electron field emission from chemical vapor deposited diamond films / **A. N. Obraztsov, I. Yu. Pavlovsky, A. P. Volkov et al.** // J. Electrochem. Soc. 1998. Vol. 145. No. 7. P. 2572–2576. <https://doi.org/10.1149/1.1838682>
54. Handbook of semiconductor manufacturing technology / eds **R. Doering, Y. Nishi**. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. 1722 p.
55. **Tsong T. T.** Field penetration and band bending near semiconductor surfaces in high electric fields // Surface Science. 1979. Vol. 81. Iss. 1. P. 28–42. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(79\)90503-X](https://doi.org/10.1016/0039-6028(79)90503-X)
56. **Thomas R. N., Wickstrom R. A., Schroder D. K., Nathanson H. C.** Fabrication and some applications of large-area silicon field emission arrays // Solid-State Electronics. 1974. Vol. 17. Iss. 2. P. 155–163. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(74\)90063-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(74)90063-X)
57. **Махов В. И., Дюжеев Н. А., Пинаев И. В.** Влияние диэлектрического покрытия туннельной толщины на эмиссионные характеристики автоэлектронного катода // XIX Всесоюзная конференция по эмиссионной электронике (Ташкент, сент. 1984 г.): секции 3, 4, 5. Ташкент: Фан, 1984. С. 45.
58. **Дюжеев Н. А., Махиборода М. А., Скворцов В. Э.** Электронно-лучевой микродисплей высокого разрешения на базе кремниевого автоэмиссионного нанокатода // Rusnanotech'08: Международный форум по нанотехнологиям: сборник тез. докл. науч.-техн. секций (Москва, 03–05 дек. 2008 г.). М.: Российская корпорация нанотехнологий, 2008. Т. 2. 536 с.
59. Разработка технологических принципов создания системы микрофокусных рентгеновских трубок на основе кремниевых автоэмиссионных нанокатодов / **Н. А. Дюжеев, Г. Д. Демин, Н. А. Филиппов и др.** // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 12. С. 1836–1842. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.12.48479.137-19>. – EDN: UGTCST.
60. **Bohling C., Sigmund W.** Self-limitation of native oxides explained // Silicon. 2016. Vol. 8. Iss. 3. P. 339–343. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9366-8>
61. **Wu C.-C., Ou K.-L., Tseng C.-L.** Fabrication and characterization of well-aligned and ultra-sharp silicon nanotip array // Nanoscale Res. Lett. 2012. Vol. 7. Iss. 1. Art. No. 120. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-120>
62. **Makhov V. I.** Ballistic field-emission devices // Proceedings of the 2nd INT Conference on Vacuum Microelectronics, Bath, England. Bristol: Taylor & Francis, 1989. P. 235–238. (IOP Conf. Series; No. 99).
63. **Park C.-M., Lim M.-S., Han M.-K.** A novel in situ vacuum encapsulated lateral field emitter triode // IEEE Electron Device Letters. 1997. Vol. 18. No. 11. P. 538–540. <https://doi.org/10.1109/55.641438>
64. Lateral silicon field-emission devices using electron beam lithography / **S. Han, S. Yang, T. Hwang et al.** // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. No. 5R. P. 2556–2559. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.2556>
65. **Han J.-W., Jae Sub Oh, Meyyappan M.** Vacuum nanoelectronics: Back to the future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. Iss. 21. Art. No. 213505. <https://doi.org/10.1063/1.4717751>
66. **Han J.-W., Moon D.-I., Meyyappan M.** Nanoscale vacuum channel transistor // Nano Lett. 2017. Vol. 17. Iss. 4. P. 2146–2151. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b04363>
67. CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data, 2016–2017 / eds **W. M. Haynes, D. R. Lide, T. J. Bruno**. 97th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. 2652 p.
68. **Wort C. J. H., Balmer R. S.** Diamond as an electronic material // Materials Today. 2008. Vol. 11. Iss. 1-2. P. 22–28. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70349-8](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70349-8)
69. SiC materials and devices / eds **M. Shur, S. L. Rumyantsev, M. E. Levinshtein**. New Jersey; London; Singapore: World Scientific, 2006. Vol. 1. 1033 p.
70. Nanoscale vacuum channel transistors fabricated on silicon carbide wafers / **J.-W. Han, M.-L. Seol, D.-I. Moon et al.** // Nat. Electron. 2019. Vol. 2. Iss. 9. P. 405–411. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0289-z>
71. **Kondratyev A. M., Rakhel A. D.** Melting line of graphite // Phys. Rev. Lett. 2019. Vol. 122. Iss. 17. Art. ID: 175702. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.175702>
72. **Subramanian K., Kang W. P., Davidson J. L.** A monolithic nanodiamond lateral field emission vacuum transistor // IEEE Electron Device Letters. 2008. Vol. 29. No. 11. P. 1259–1261. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2005516>
73. A review of recent results on diamond vacuum lateral field emission device operation in radiation environments / **K. Subramanian, W. P. Kang, J. L. Davidson et al.** // Microelectronic Engineering. 2011. Vol. 88. Iss. 9. P. 2924–2929. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.03.161>
74. **Ghosh N., Kang W. P., Davidson J. L.** Nanodiamond lateral field emission vacuum logic OR gate // Electronics Letters. 2011. Vol. 47. Iss. 16. P. 926–927. <https://doi.org/10.1049/el.2011.1586>

75. **Ghosh N., Kang W. P., Davidson J. L.** Fabrication and implementation of nanodiamond lateral field emission diode for logic OR function // *Diamond and Related Materials*. 2012. Vol. 23. P. 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.01.030>
76. Performance characteristics of nanocrystalline diamond vacuum field emission transistor array / **S. H. Hsu, W. P. Kang, J. L. Davidson et al.** // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 111. Iss. 11. Art. No. 114502. <https://doi.org/10.1063/1.4723833>
77. **Hsu S. H., Kang W. P., Raina S., Huang J. H.** Nanodiamond vacuum field emission device with gate modulated triode characteristics // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. Iss. 20. Art. No. 203105. <https://doi.org/10.1063/1.4807128>
78. Nanodiamond vacuum field emission microtriode / **S.-H. Hsu, W. P. Kang, S. Raina et al.** // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2017. Vol. 35. Iss. 3. Art. No. 032201. <https://doi.org/10.1116/1.4981018>
79. **Nabi G.** Morphology role in 3D flower like GaN nanostructures as excellent field emitters // *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 25. Art. ID: 101287. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101287>
80. Self-align-gated GaN field emitter arrays sharpened by a digital etching process / **P.-C. Shih, G. Rughoobur, K. Cheng et al.** // *IEEE Electron Device Letters*. 2021. Vol. 42. No. 3. P. 422–425. <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3052715>
81. **Han J.-W., Jae Sub Oh, Meyyappan M.** Cofabrication of vacuum field emission transistor (VFET) and MOSFET // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2014. Vol. 13. No. 3. P. 464–468. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2014.2310774>
82. **Itoh J., Hirano T., Kanemaru S.** Ultrastable emission from a metal–oxide–semiconductor field-effect transistor-structured Si emitter tip // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 69. Iss. 11. P. 1577–1578. <https://doi.org/10.1063/1.117035>
83. **Yang W., She J., Deng S., Xu N.** Field emission from a MOSFET-controlled ZnO-nanowire cold cathode // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2012. Vol. 59. No. 12. P. 3641–3646. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2220548>
84. Gated Si-tip with on-tip integrated gate-all-around field effect transistor for actively controlled field electron emission / **M. Zeng, Yi. Huang, Yu. Huang et al.** // *IEEE Electron Device Letters*. 2022. Vol. 43. No. 3. P. 466–469. <https://doi.org/10.1109/LED.2022.3148397>
85. **Татаренко Н. И., Кравченко В. Ф.** Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. М.: Физматлит, 2006. 192 с.
86. **Дюжев Н. А., Махиборода М. А., Федирко В. Л.** Исследование различных режимов автоэлектронной эмиссии кремниевого кантилевера // *Вакуумная наука и техника: материалы XIV науч.-техн. конф. (Сочи, 08–15 окт. 2007 г.)*. Сочи: МИЭМ, 2007. С. 248–251.
87. Patent 3500102 US. Thin electron tube with electron emitters at intersections of crossed conductors / **M. E. Crost, K. Shoulders, M. H. Zinn**; filed: 15.05.1967; publ.: 10.03.1970.
88. **Meyer R.** Microtips fluorescent display // *Tech. Digest of Japan Display'86*. 1986. P. 513–515.
89. **Busta H. H.** Field emission flat panel displays // *Vacuum Microelectronics* / ed. W. Zhu. Chichester: Wiley, 2001. P. 289–347. <https://doi.org/10.1002/0471224332.ch7>
90. **Terranova M. L., Orlanducci S., Rossi M., Tamburri E.** Nanodiamonds for field emission: State of the art // *Nanoscale*. 2015. Vol. 7. Iss. 12. P. 5094–5114. <https://doi.org/10.1039/C4NR07171A>
91. **Basu A., Swanwick M. E., Fomani A. A., Velásquez-García L. F.** A portable X-ray source with a nanostructured Pt-coated silicon field emission cathode for absorption imaging of low-Z materials // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015. Vol. 48. No. 22. Art. No. 225501. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/22/225501>
92. MEMS ion source for ion mobility spectrometry / **T. Grzebyk, P. Szyszka, M. Krysztof et al.** // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2019. Vol. 37. Iss. 2. Art. ID: 022201. <https://doi.org/10.1116/1.5068750>
93. Prototype of cathodoluminescent lamp for general lighting using carbon fiber field emission cathode / **E. P. Sheshin, A. Yu. Kolodyazhnyj, N. N. Chadaev et al.** // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2019. Vol. 37. Iss. 3. Art. ID: 031213. <https://doi.org/10.1116/1.5070108>
94. A cylindrical triode ultrahigh vacuum ionization gauge with a carbon nanotube cathode / **J. Zhang, J. Wei, D. Li et al.** // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. Iss. 7. Art. No. 1636. <https://doi.org/10.3390/nano11071636>
95. Position and attitude tolerances of carbon nanotube field emission cathode as a neutralizer in an ion engine system / **J. Kinoshita, R. Ikeda, M. Adachi et al.** // *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.* 2021. Vol. 64. No. 5. P. 288–291. <https://doi.org/10.2322/tjsass.64.288>
96. Far UVC light for *E. coli* disinfection generated by carbon nanotube cold cathode and sapphire anode / **S. T. Yoo, J. Y. Lee, A. Rodiansyah et al.** // *Current Applied Physics*. 2021. Vol. 28. P. 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2021.05.007>

97. Nanoscale vacuum channel Hall sensors / *L. Fan, J. Bi, B. Zhao et al.* // *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22. No. 4. P. 23806–23811. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3218466>
98. *Harafuji K., Tsuchiya T., Kawamura K.* Molecular dynamics simulation for evaluating melting point of wurtzite-type GaN crystal // *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 96. Iss. 5. P. 2501–2512. <https://doi.org/10.1063/1.1772878>
99. *Сечи Ф., Буджатти М.* Мощные твердотельные СВЧ-усилители / пер. с англ. В. О. Султанова. М.: Техносфера, 2016. 412 с.

Обзор поступил в редакцию 07.02.2023 г.; одобрен после рецензирования 09.06.2023 г.;
принят к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Дюжнев Николай Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, директор Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), dyuzhev@ckp-miet.ru

Евсиков Илья Дмитриевич – инженер Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база», аспирант Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), evsikov.ilija@yandex.ru

References

1. Fowler R. H., Nordheim L. Electron emission in intense electric fields. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1928, vol. 119, iss. 781, pp. 173–181. <https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0091>
2. Nordheim L. Zur Elektronentheorie der Metalle. I. *Ann. Phys.*, 1931, vol. 401, iss. 5, pp. 607–640. <https://doi.org/10.1002/andp.19314010507>
3. Forbes R. G. Comments on the continuing widespread and unnecessary use of a defective emission equation in field emission related literature. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, iss. 21, art. no. 210901. <https://doi.org/10.1063/1.5117289>
4. Márquez-Mijares M., Lepetit B. A three dimensional numerical quantum mechanical model of field electron emission from metallic surfaces covered with carbon adsorbates. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, iss. 6, art. no. 065107. <https://doi.org/10.1063/1.5094238>
5. Forbes R. G. Renewing the mainstream theory of field and thermal electron emission. *Modern Developments in Vacuum Electron Sources*, eds G. Gaertner, W. Knapp, R. G. Forbes. Cham, Springer, 2020, pp. 387–447 https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7_9
6. Forbes R. G. 21st century planar field emission theory and its role in vacuum breakdown science. *2020 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Padova, IEEE, 2021, pp. 3–10. <https://doi.org/10.1109/ISDEIV46977.2021.9587119>
7. Jensen K. L. A tutorial on electron sources. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, vol. 46, no. 6, pp. 1881–1899. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2782485>
8. Jensen K. L. A reformulated general thermal-field emission equation. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, iss. 6, art. no. 065302. <https://doi.org/10.1063/1.5109676>
9. Lepetit B. Electronic field emission models beyond the Fowler – Nordheim one. *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 122, iss. 21, art. no. 215105. <https://doi.org/10.1063/1.5009064>
10. Lepetit B. A quantum mechanical model of electron field emission from two dimensional materials. Application to graphene. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, iss. 14, art. no. 144302. <https://doi.org/10.1063/5.0047771>
11. Kyritsakis A., Djurabekova F. A general computational method for electron emission and thermal effects in field emitting nanotips. *Computational Materials Science*, 2017, vol. 128, pp. 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.11.010>
12. Kyritsakis A., Veske M., Djurabekova F. General scaling laws of space charge effects in field emission. *New J. Phys.*, 2021, vol. 23, no. 6, art. no. 063003. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/abffa8>

13. Egorov N. V., Sheshin E. P. *Field emission: Principles and devices*. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2011. 703 p. (In Russian).
14. Fursey G. N. *Field emission*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2012. 319 p. (In Russian).
15. Buck D. A., Shoulders K. R. An approach to microminiature printed systems. *Papers and Discussions Presented at the Dec. 3–5, 1958, Eastern Joint Computer Conference: Modern Computers: Objectives, Designs, Applications (AIEE-ACM-IRE '58 (Eastern))*. New York, ACM Press, 1958, pp. 55–59. <https://doi.org/10.1145/1458043.1458057>
16. Shoulders K. R. Microelectronics using electron-beam-activated machining techniques. *Advances in Computers*, 1961, vol. 2, pp. 135–293. [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(08\)60142-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(08)60142-4)
17. Spindt C. A., Shoulders K. R. Research in micron-size field-emission tubes. *IEEE 1966 8th Conference on Tube Techniques*. New York, IEEE, 1966, p. 143.
18. Spindt C. A. A thin-film field-emission cathode. *Journal of Applied Physics*, 1968, vol. 39, iss. 7, pp. 3504–3505. <https://doi.org/10.1063/1.1656810>
19. Spindt C. A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E. R. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, iss. 12, pp. 5248–5263. <https://doi.org/10.1063/1.322600>
20. Elinson M. I., Vasil'ev G. F. *A way to reduce ion bombardment of metal peaks emitting electrons*. Copyright certificate 107388 USSR, publ. 10.09.1957. (In Russian).
21. Djuzhev N. A., Ishkarin A. B. *Device for field emission*. Patent 2044363 RF, publ. 20.09.1995. (In Russian).
22. Jennings S. G. The mean free path in air. *Journal of Aerosol Science*, 1988, vol. 19, iss. 2, pp. 159–166. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(88\)90219-4](https://doi.org/10.1016/0021-8502(88)90219-4)
23. Nirantar S., Ahmed T., Bhaskaran M., Han J., Walia S., Sriram S. Electron emission devices for energy-efficient systems. *Adv. Intell. Syst.*, 2019, vol. 1, iss. 4, art. ID: 1900039. <https://doi.org/10.1002/aisy.201900039>
24. Nottingham W. B. Remarks on energy losses attending thermionic emission of electrons from metals. *Phys. Rev.*, 1941, vol. 59, iss. 11, p. 906. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.59.906.2>
25. Mesyats G. A. *Explosive electron emission*. Moscow: Fizmatlit Publ., 2011. 280 p. (In Russian).
26. Huang Z., Huang Y., Pan Z., She J., Deng S., Chen J., Xu N. Self-modulated field electron emitter: Gated device of integrated Si tip-on-nano-channel. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 109, iss. 23, art. no. 233501. <https://doi.org/10.1063/1.4971336>
27. Guerrero S. A., Akinwande A. I. Nanofabrication of arrays of silicon field emitters with vertical silicon nanowire current limiters and self-aligned gates. *Nanotechnology*, 2016, vol. 27, no. 29, art. no. 295302. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/29/295302>
28. Kolosko A. G., Popov E. O., Filippov S. V. Analysis of the behavior of individual emission sites on the surface of a multi-tip field cathode. *Tech. Phys. Lett.*, 2019, vol. 45, iss. 3, pp. 304–307. <https://doi.org/10.1134/S1063785019030283>
29. Toijala H., Eimre K., Kyritsakis A., Zadin V., Djurabekova F. *Ab initio* calculation of field emission from metal surfaces with atomic-scale defects. *Phys. Rev. B*, 2019, vol. 100, iss. 16, art. ID: 165421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.165421>
30. Fujita S., Shimoyama H. Mechanism of surface-tension reduction by electric-field application: Shape changes in single-crystal field emitters under thermal-field treatment. *Phys. Rev. B*, 2007, vol. 75, iss. 23, art. ID: 235431. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.235431>
31. Honda Y., Nanba M., Miyakawa K., Kubota M., Nagao M., Neo Y., Mimura H., Egami N. Double-gated, Spindt-type field emitter with improved electron beam extraction. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, vol. 63, no. 5, pp. 2182–2189. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2545710>
32. Nagao M., Gotoh Y., Neo Y., Mimura H. Beam profile measurement of volcano-structured double-gate Spindt-type field emitter arrays. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2016, vol. 34, iss. 2, art. ID: 02G108. <https://doi.org/10.1116/1.4944453>
33. Deka N., Subramanian V. On-chip fully integrated field emission arrays for high-voltage MEMS applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, no. 9, pp. 3753–3760. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3006167>
34. Chang W.-T., Chuang T.-Y., Su Ch.-W. Metal-based asymmetric field emission diodes operated in the air. *Microelectronic Engineering*, 2020, vol. 232, art. no. 111418. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111418>
35. Chang W.-T., Cheng M.-Ch., Chuang T.-Y., Tsai M.-Y. Field emission air-channel devices as a voltage adder. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, iss. 12, art. no. 2378. <https://doi.org/10.3390/nano10122378>

36. Nirantar S., Ahmed T., Ren G., Gutruf Ph., Xu Ch., Bhaskaran M., Walia S., Sriram Sh. Metal–air transistors: Semiconductor-free field-emission air-channel nanoelectronics. *Nano Lett.*, 2018, vol. 18, no. 12, pp. 7478–7484. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b02849>
37. De Rose L. B., Scherer A., Jones W. M. Suspended nanoscale field emitter devices for high-temperature operation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, no. 11, pp. 5125–5131. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3019765>
38. Xu J., Hu H., Yang W., Li C., Shi Yu., Shi Yon., Wang Q., Zhang X. Nanoscale vacuum channel transistor with in-plane collection structure. *Nanotechnology*, 2020, vol. 31, no. 6, art. no. 065202. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab51cb>
39. Xu J., Lin C., Shi Y., Li Y., Zhao X., Zhang X., Zhang J. Optimization of a field emission electron source based on nano-vacuum channel structures. *Micromachines*, 2022, vol. 13, iss. 8, art. no. 1274. <https://doi.org/10.3390/mi13081274>
40. Srisophon S. Field effect-controlled space-charge limited emission triode with nanogap channels. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, vol. 42, no. 10, pp. 1540–1543. <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3103557>
41. Giubileo F., Di Bartolomeo A., Lemmo L., Luongo G., Urban F. Field emission from carbon nanostructures. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, iss. 4, art. no. 526. <https://doi.org/10.3390/app8040526>
42. Youh M.-J., Lin C.-S., Pu N.-W., Liu Y.-M., Youh R.-Y., Li H.-Q., Tang P.-Y., Lin M.-H., Ger M.-D. Comparison of field emission performances and durability of three nanocarbon materials. *Vacuum*, 2020, vol. 177, art. ID: 109382. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109382>
43. Lwin Z. Y., Sheshin E. P., Kyaw N. C., Myo M. M., Win L. N. Carbon materials for field emission instruments based on them. *Trudy MFTI = Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, 2018, vol. 10, no. 2 (38), pp. 30–46. (In Russian). EDN: XTWBOH.
44. Shesterkin V. I. Operating emission characteristics of various types of field-emission cathodes. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2020, vol. 65, pp. 1–26. <https://doi.org/10.1134/S1064226920010040>
45. Dwivedi N., Dhand Ch., Carey J. D., Anderson E. C., Kumar R., Srivastava A. K., Malik H. K., Saifullah M. S. M. et al. The rise of carbon materials for field emission. *J. Mater. Chem. C*, 2021, vol. 9, iss. 8, pp. 2620–2659. <https://doi.org/10.1039/D0TC05873D>
46. Eletskii A. V. Carbon nanotube-based electron field emitters. *Phys.-Usp.*, 2010, vol. 53, no. 9, pp. 863–892. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0180.201009a.0897>
47. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, vol. 306, iss. 5696, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
48. Egorov N. V., Sheshin E. P. The current state of the field emission electronics. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, no. 3, pp. 5–15. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0207352817030088>.
EDN: YIVPRJ.
49. Xiao Z., She J., Deng S., Tang Z., Li Z., Lu J., Xu N. Field electron emission characteristics and physical mechanism of individual single-layer graphene. *ACS Nano*, 2010, vol. 4, iss. 11, pp. 6332–6336. <https://doi.org/10.1021/nn101719r>
50. Shao X., Srinivasan A., Ang W. K., Khursheed A. A high-brightness large-diameter graphene coated point cathode field emission electron source. *Nat. Commun.*, 2018, vol. 9, art. no. 1288. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03721-y>
51. Sato T., Yamamoto S., Nagao M., Matsukawa T., Kanemaru S., Itoh J. Fabrication and characterization of HfC coated Si field emitter arrays. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2003, vol. 21, iss. 4, pp. 1589–1593. <https://doi.org/10.1116/1.1569933>
52. Patra R., Ghosh S., Sheremet E., Menaka Jha, Rodriguez R. D., Lehmann D., Ganguli A. K., Schmidt H. et al. Enhanced field emission from lanthanum hexaboride coated multiwalled carbon nanotubes: Correlation with physical properties. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 116, iss. 16, art. no. 164309. <https://doi.org/10.1063/1.4898352>
53. Obratsov A. N., Pavlovsky I. Yu., Volkov A. P., Rakova E. V., Nagovitsyn S. P. Electron field emission from chemical vapor deposited diamond films. *J. Electrochem. Soc.*, 1998, vol. 145, no. 7, pp. 2572–2576. <https://doi.org/10.1149/1.1838682>
54. Doering R., Nishi Y., eds. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2008. 1722 p.
55. Tsong T. T. Field penetration and band bending near semiconductor surfaces in high electric fields. *Surface Science*, 1979, vol. 81, iss. 1, pp. 28–42. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(79\)90503-X](https://doi.org/10.1016/0039-6028(79)90503-X)

56. Thomas R. N., Wickstrom R. A., Schroder D. K., Nathanson H. C. Fabrication and some applications of large-area silicon field emission arrays. *Solid-State Electronics*, 1974, vol. 17, iss. 2, pp. 155–163. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(74\)90063-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(74)90063-X)
57. Makhov V. I., Dyuzhev N. A., Pinaev I. V. Effect of dielectric coating of tunnel thickness on emission characteristics of field-emission cathode. *XIX Vsesoyuznaya konferentsiya po emissionnoy elektronike (Tashkent, sent. 1984 g.): seksii 3, 4, 5*. Tashkent, Fan Publ., 1984, p. 45. (In Russian).
58. Dyuzhev N. A., Makhboroda M. A., Skvortsov V. E. Cathode-ray high-resolution micro display based on silicon field emission nanocathode. *Rusnanotech'08: Mezhdunarodnyy forum po nanotekhnologiyam: sbornik tez. dokl. nauch.-tekhn. sektsiy (Moskva, 03–05 dek. 2008 g.)*. Moscow: Rossiyskaya korporatsiya nanotekhnologiy Publ., 2008. Vol. 2. 536 p. (In Russian).
59. Djuzhev N. A., Demin G. D., Filippov N. A., Evsikov I. D., Glagolev P. Yu., Makhboroda M. A., Chkhalo N. I., Salashchenko N. N. et al. Development of technological principles for creating a system of microfocus X-ray tubes based on silicon field emission nanocathodes. *Tech. Phys.*, 2019, vol. 64, pp. 1742–1748. <https://doi.org/10.1134/S1063784219120053>
60. Bohling C., Sigmund W. Self-limitation of native oxides explained. *Silicon*, 2016, vol. 8, iss. 3, pp. 339–343. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9366-8>
61. Wu C.-C., Ou K.-L., Tseng C.-L. Fabrication and characterization of well-aligned and ultra-sharp silicon nanotip array. *Nanoscale Res. Lett.*, 2012, vol. 7, iss. 1, art. no. 120. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-120>
62. Makhov V. I. Ballistic field-emission devices. *Proceedings of the 2nd INT Conference on Vacuum Microelectronics*, Bath, England. Bristol, Taylor & Francis, 1989, pp. 235–238. IOP Conf. Series, no. 99.
63. Park C.-M., Lim M.-S., Han M.-K. A novel in situ vacuum encapsulated lateral field emitter triode. *IEEE Electron Device Letters*, 1997, vol. 18, no. 11, pp. 538–540. <https://doi.org/10.1109/55.641438>
64. Han S., Yang S., Hwang T., Lee J., Jong Duk Lee, Shin H. Lateral silicon field-emission devices using electron beam lithography. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 39, no. 5R, pp. 2556–2559. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.2556>
65. Han J.-W., Jae Sub Oh, Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to the future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, iss. 21, art. no. 213505. <https://doi.org/10.1063/1.4717751>
66. Han J.-W., Moon D.-I., Meyyappan M. Nanoscale vacuum channel transistor. *Nano Lett.*, 2017, vol. 17, iss. 4, pp. 2146–2151. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b04363>
67. Haynes W. M., Lide D. R., Bruno T. J., eds. *CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data, 2016–2017*. 97th ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2016. 2652 p.
68. Wort C. J. H., Balmer R. S. Diamond as an electronic material. *Materials Today*, 2008, vol. 11, iss. 1-2, pp. 22–28. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70349-8](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70349-8)
69. Shur M., Rumyantsev S. L., Levinshtein M. E., eds. *SiC materials and devices*. New Jersey, London, Singapore, World Scientific, 2006. Vol. 1. 1033 p.
70. Han J.-W., Seol M.-L., Moon D.-I., Hunter G., Meyyappan M. Nanoscale vacuum channel transistors fabricated on silicon carbide wafers. *Nat. Electron.*, 2019, vol. 2, iss. 9, pp. 405–411. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0289-z>
71. Kondratyev A. M., Rakhel A. D. Melting line of graphite. *Phys. Rev. Lett.*, 2019, vol. 122, iss. 17, art. ID: 175702. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.175702>
72. Subramanian K., Kang W. P., Davidson J. L. A monolithic nanodiamond lateral field emission vacuum transistor. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, vol. 29, no. 11, pp. 1259–1261. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2005516>
73. Subramanian K., Kang W. P., Davidson J. L., Ghosh N., Galloway K. F. A review of recent results on diamond vacuum lateral field emission device operation in radiation environments. *Microelectronic Engineering*, 2011, vol. 88, iss. 9, pp. 2924–2929. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.03.161>
74. Ghosh N., Kang W. P., Davidson J. L. Nanodiamond lateral field emission vacuum logic OR gate. *Electronics Letters*, 2011, vol. 47, iss. 16, pp. 926–927. <https://doi.org/10.1049/el.2011.1586>
75. Ghosh N., Kang W. P., Davidson J. L. Fabrication and implementation of nanodiamond lateral field emission diode for logic OR function. *Diamond and Related Materials*, 2012, vol. 23, pp. 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.01.030>
76. Hsu S. H., Kang W. P., Davidson J. L., Huang J. H., Kerns D. V. Performance characteristics of nanocrystalline diamond vacuum field emission transistor array. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, iss. 11, art. no. 114502. <https://doi.org/10.1063/1.4723833>

77. Hsu S. H., Kang W. P., Raina S., Huang J. H. Nanodiamond vacuum field emission device with gate modulated triode characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, iss. 20, art. no. 203105. <https://doi.org/10.1063/1.4807128>
78. Hsu S. H., Kang W. P., Raina S., Howell M., Huang J. H. Nanodiamond vacuum field emission microtriode. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2017, vol. 35, iss. 3, art. no. 032201. <https://doi.org/10.1116/1.4981018>
79. Nabi G. Morphology role in 3D flower like GaN nanostructures as excellent field emitters. *Materials Today Communications*, 2020, vol. 25, art. ID: 101287. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101287>
80. Shih P.-C., Rughoobur G., Cheng K., Akinwande A. I., Palacios T. Self-align-gated GaN field emitter arrays sharpened by a digital etching process. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 422–425. <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3052715>
81. Han J.-W., Jae Sub Oh, Meyyappan M. Cofabrication of vacuum field emission transistor (VFET) and MOSFET. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2014, vol. 13, no. 3, pp. 464–468. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2014.2310774>
82. Itoh J., Hirano T., Kanemaru S. Ultrastable emission from a metal–oxide–semiconductor field-effect transistor-structured Si emitter tip. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 69, iss. 11, pp. 1577–1578. <https://doi.org/10.1063/1.117035>
83. Yang W., She J., Deng S., Xu N. Field emission from a MOSFET-controlled ZnO-nanowire cold cathode. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, vol. 59, no. 12, pp. 3641–3646. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2220548>
84. Zeng M., Huang Yi., Huang Yu., Chen J., She J., Deng S. Gated Si-tip with on-tip integrated gate-all-around field effect transistor for actively controlled field electron emission. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, vol. 43, no. 3, pp. 466–469. <https://doi.org/10.1109/LED.2022.3148397>
85. Tatarenko N. I., Kravchenko V. F. *Field-emission nanostructures and devices based on them*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 192 p. (In Russian).
86. Dyuzhev N. A., Makhboroda M. A., Fedirko V. L. Study of various modes of silicon cantilever's field emission. *Vakuumnaya nauka i tekhnika: materialy nauch.-tekhn. konf. (Sochi, 08–15 okt. 2007 g.)*. Sochi, MIEM Publ., 2007, pp. 248–251. (In Russian).
87. Crost M. E., Shoulders K., Zinn M. H. *Thin electron tube with electron emitters at intersections of crossed conductors*. Patent US3500102 United States, filed: 15.05.1967, publ.: 10.03.1970.
88. Meyer R. Microtips fluorescent display. *Tech. Digest of Japan Display '86*, 1986, pp. 513–515.
89. Busta H. H. Field emission flat panel displays. *Vacuum Microelectronics*, ed. W. Zhu. Chichester, Wiley, 2001, pp. 289–347. <https://doi.org/10.1002/0471224332.ch7>
90. Terranova M. L., Orlanducci S., Rossi M., Tamburri E. Nanodiamonds for field emission: State of the art. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, iss. 12, pp. 5094–5114. <https://doi.org/10.1039/C4NR07171A>
91. Basu A., Swanwick M. E., Fomani A. A., Velásquez-García L. F. A portable X-ray source with a nanostructured Pt-coated silicon field emission cathode for absorption imaging of low-Z materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, vol. 48, no. 22, art. no. 225501. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/22/225501>
92. Grzebyk T., Szyszka P., Krysztof M., Górecka-Drzazga A., Dziuban J. MEMS ion source for ion mobility spectrometry. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2019, vol. 37, iss. 2, art. ID: 022201. <https://doi.org/10.1116/1.5068750>
93. Sheshin E. P., Kolodyazhnyj A. Yu., Chadaev N. N., Getman A. O., Danilkin M. I., Ozol D. I. Prototype of cathodoluminescent lamp for general lighting using carbon fiber field emission cathode. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2019, vol. 37, iss. 3, art. ID: 031213. <https://doi.org/10.1116/1.5070108>
94. Zhang J., Wei J., Li D., Zhang H., Wang Y., Zhang X. A cylindrical triode ultrahigh vacuum ionization gauge with a carbon nanotube cathode. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, iss. 7, art. no. 1636. <https://doi.org/10.3390/nano11071636>
95. Kinoshita J., Ikeda R., Adachi M., Shiraki R., Morita T., Yamamoto N., Nakano M., Ohkawa Y., Funaki I. Position and attitude tolerances of carbon nanotube field emission cathode as a neutralizer in an ion engine system. *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, 2021, vol. 64, no. 5, pp. 288–291. <https://doi.org/10.2322/tjsass.64.288>
96. Yoo S. T., Lee J. Y., Rodiansyah A., Yune T. Y., Park K. Ch. Far UVC light for *E. coli* disinfection generated by carbon nanotube cold cathode and sapphire anode. *Current Applied Physics*, 2021, vol. 28, pp. 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2021.05.007>
97. Fan L., Bi J., Zhao B., Yan G., Ma Y., Zhao F. Nanoscale vacuum channel Hall sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, no. 24, pp. 23806–23811. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3218466>

98. Harafuji K., Tsuchiya T., Kawamura K. Molecular dynamics simulation for evaluating melting point of wurtzite-type GaN crystal. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 96, iss. 5, pp. 2501–2512. <https://doi.org/10.1063/1.1772878>

99. Sechi F., Bujatti M. *Solid-state microwave high-power amplifiers*. Norwood, MA, Artech House, 2009. 315 p.

The review was submitted 07.02.2023; approved after reviewing 09.06.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Nikolay A. Djuzhev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Director, Center for Collective Use “Microsystem Technology and Electronic Component Base”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dyuzhev@ckp-miet.ru

Ilya D. Evsikov – Engineer of the Center for Collective Use “Microsystem Technology and Electronic Component Base”, PhD student of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), evsikov.ilija@yandex.ru

Уважаемые авторы и читатели!

Вышли в свет журналы

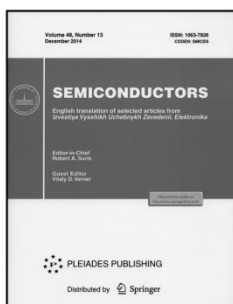


RUSSIAN MICROELECTRONICS

Vol. 51, No. 7, 2022. - ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,

SEMICONDUCTORS

Vol. 56, No. 13, 2022. - ISSN PRINT: 1063-7826,
ISSN ONLINE: 1090-6479,



в которых опубликованы избранные
статьи журнала «Известия высших
учебных заведений. Электроника».

<http://pleiades.online>
<http://link.springer.com>

Исследование теплоэлектрических свойств мощных MOSFET-транзисторов

В. И. Смирнов^{1,2}, А. А. Гавриков²

¹Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия

²Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск,
Россия

smirnov-vi@mail.ru

Аннотация. MOSFET-транзисторы характеризуются способностью коммутировать большие электрические токи (десятки и сотни ампер) с высокой частотой. При этом рассеиваемая мощность достигает 1 кВт, поэтому требуется обеспечить эффективный отвод тепла от активной области кристалла и разработать соответствующие средства контроля теплового сопротивления переход – корпус. В работе представлены результаты исследований теплоэлектрических свойств мощных MOSFET-транзисторов. Исследования проведены с помощью аппаратно-программного комплекса, в котором наряду со стандартными методами измерения теплового сопротивления переход – корпус реализован модуляционный метод нагрева объекта импульсами греющего тока с гармоническим законом широтно-импульсной модуляции. Для определения температуры активной области кристалла в паузах между греющими импульсами измерен температурочувствительный, или термометрический, параметр, в качестве которого использовано напряжение между истоком и стоком. Для исключения влияния переходных электрических процессов на результаты измерений теплового сопротивления значения температурочувствительного параметра экстраполировано к моменту окончания каждого импульса греющего тока. Для экстраполяции использованы корневой и логарифмический законы изменения температурочувствительного параметра в процессе охлаждения кристалла транзистора после его импульсного нагрева. Показано, что результаты измерений компонент теплового сопротивления, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой.

Ключевые слова: мощные транзисторы, тепловое сопротивление, модуляционный метод, переходная тепловая характеристика, аппаратно-программный комплекс

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-29-00026).

Для цитирования: Смирнов В. И., Гавриков А. А. Исследование теплоэлектрических свойств мощных MOSFET-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 600–611. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-600-611>. – EDN: TQEMOG.

Study of the thermoelectric properties of powerful MOSFETs

V. I. Smirnov^{1,2}, A. A. Gavrikov²

¹*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

²*Ulyanovsk branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia*

smirnov-vi@mail.ru

Abstract. The MOSFETs are marked by the ability to commutate high currents (tens to hundreds amperes) with high frequency. With that the dissipated power reaches 1 kW. Due to this it is required to assure effective dissipation of heat from active area of the crystal and to develop appropriate means of junction–case thermal resistance control. In this work, the results of studies of the thermoelectric properties of high-power MOSFETs are presented. The studies were carried out using a hardware–software complex, in which, along with the standard methods for measuring the junction–case thermal resistance, a modulation method was implemented that uses the heating of an object by heating current pulses with a harmonic pulse–width modulation law. To measure the temperature of the active area in the pauses between the heating pulses, the temperature-sensitive, or thermometric, parameter was measured, which was the source–drain voltage. To eliminate the impact of transient electrical processes on the results of thermal resistance measurements, the temperature-sensitive parameter values were extrapolated to the end of each heating pulse. For extrapolation, it is proposed to use the root and logarithmic laws of the change in the temperature-sensitive parameter in the process of cooling the transistor crystal after its pulsed heating. It has been demonstrated that the results of measurements of the thermal resistance components obtained by various methods are in good agreement with each other.

Keywords: power transistors, thermal resistance, modulation method, transient thermal response, hardware–software complex

Funding: the work has been supported by Russian Science Foundation (project no. 23-29-00026).

For citation: Smirnov V. I., Gavrikov A. A. Study of the thermoelectric properties of powerful MOSFETs. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 600–611. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-600-611>. – EDN: TQEMOG.

Введение. Отличительной особенностью мощных MOSFET- и IGBT-транзисторов является их способность коммутировать большие электрические токи с высокой частотой. При этом значения коммутируемых токов составляют десятки и сотни ампер, а рассеиваемая в транзисторах мощность может достигать 1 кВт. Это обстоятельство требует обеспечения эффективного отвода тепла от активной области кристалла (*p–n*-перехода) транзистора к его корпусу, а также разработки соответствующих средств контроля теплового сопротивления переход – корпус.

Методы измерения теплового сопротивления. Качество теплоотвода любого полупроводникового прибора, включая MOSFET-транзисторы, характеризуется тепловым сопротивлением переход – корпус R_{Tjc} , определяемым выражением

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P} = \frac{\Delta T_j}{I_{гр} U},$$

где T_j – температура электронно-дырочного перехода транзистора; T_c – фиксированная температура корпуса объекта; P – мощность, рассеиваемая в объекте; $I_{гр}$ – греющий ток в канале транзистора (ток стока); U – напряжение между стоком и истоком транзистора [1].

Методы измерения теплового сопротивления R_{Tjc} основаны на разогреве полупроводникового прибора импульсами тока $I_{гр}$, в паузах между которыми измеряют приращение температуры перехода ΔT_j , вызванное воздействием импульсов греющего тока. Разогрев объекта осуществляют либо импульсами постоянной длительности [2], либо импульсами длительностью, увеличивающейся по логарифмическому закону [3]. Используют также разогрев переменной тепловой мощностью, для чего через объект пропускают широтно-импульсно-модулированные импульсы греющего тока с гармоническим законом модуляции [4].

Температура перехода T_j определяется косвенным способом на основе измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), который линейно зависит от температуры перехода. Для диодов в качестве ТЧП используют прямое падение напряжения на p – n -переходе при протекании через него малого измерительного тока $I_{изм}$, для биполярных транзисторов – напряжение база – эмиттер $U_{БЭ}$, для мощных MOSFET-транзисторов – сопротивление канала или напряжение на антипараллельном диоде, для IGBT-транзисторов – напряжение коллектор – эмиттер $U_{КЭ}$ [5].

Для мощных транзисторов с большой рассеиваемой мощностью тепловые сопротивления R_{Tjc} имеют относительно невысокие значения. При этом могут возникнуть факторы, способные оказать серьезное влияние на точность измерения R_{Tjc} . В частности, это длительность греющих импульсов $\tau_{имп}$, переходные электрические процессы, связанные с рассасыванием неосновных носителей заряда после переключения образца из режима нагрева в режим измерения ТЧП [1], температурный тренд корпуса транзистора и др. Так, например, ОСТ 11 0944-96 [2] и MIL-STD-750-3 [3] рекомендовано устанавливать $\tau_{имп}$ в 3–5 раз превышающую тепловую постоянную времени кристалл – корпус. При этом условии в процессе нагрева транзистора температура T_j достигает стационарного значения, а температура T_c остается неизменной. Но корпуса транзисторов могут существенно различаться между собой, поэтому диапазон рекомендуемых значений $\tau_{имп}$ получается довольно широкий – от 10 до 500 мс [6]. Определить оптимальное значение $\tau_{имп}$ можно на основе анализа переходной тепловой характеристики, представляющей собой зависимость температуры перехода T_j от длительности греющих импульсов. Данный метод положен в основу стандарта [7].

Важными факторами, влияющими на точность измерения R_{Tjc} , являются переходные электрические процессы, связанные с инжекцией неосновных носителей заряда через p – n -переход при нагреве транзистора и последующим их рассасыванием при измерении ТЧП. Для уменьшения влияния этого фактора измерение ТЧП проводят с некоторой временной задержкой относительно окончания греющего импульса. Но время задержки для разных типов транзисторов может существенно различаться. Кардинально устранить влияние времени задержки можно, экстраполируя измеренные значения ТЧП к моменту окончания греющего импульса.

Для уменьшения влияния температурного тренда корпуса транзистора, который для мощных транзисторов имеет существенное значение, стандартом [7] рекомендуется проводить измерения R_{Tjc} , закрепляя объект измерения на «холодных плитах» – медных радиаторах с проточным охлаждением. Значительно уменьшить влияние этого фактора можно, используя модуляцию греющей мощности по гармоническому закону [8]. В то же время модуляционный метод, так же как и метод, основанный на анализе переходной характеристики, позволяет определять компоненты теплового сопротивления всего пути, по которому распространяется тепловой поток от активной области к корпусу прибора и далее в окружающую среду. Для этого измеряют частотную зависимость вещественной части $\text{Re } Z_T(\nu)$ теплового импеданса и проводят ее анализ [9].

Особенности измерения теплового сопротивления MOSFET-транзисторов. Объект исследования – мощный MOSFET-транзистор, структура базовой ячейки которого изображена на рис. 1, а, конструкция корпуса – на рис. 1, б. Особенностью структуры такого транзистора является наличие паразитного антипараллельного диода между p^+ - и n^- -областями транзистора. В рабочих режимах транзистора при

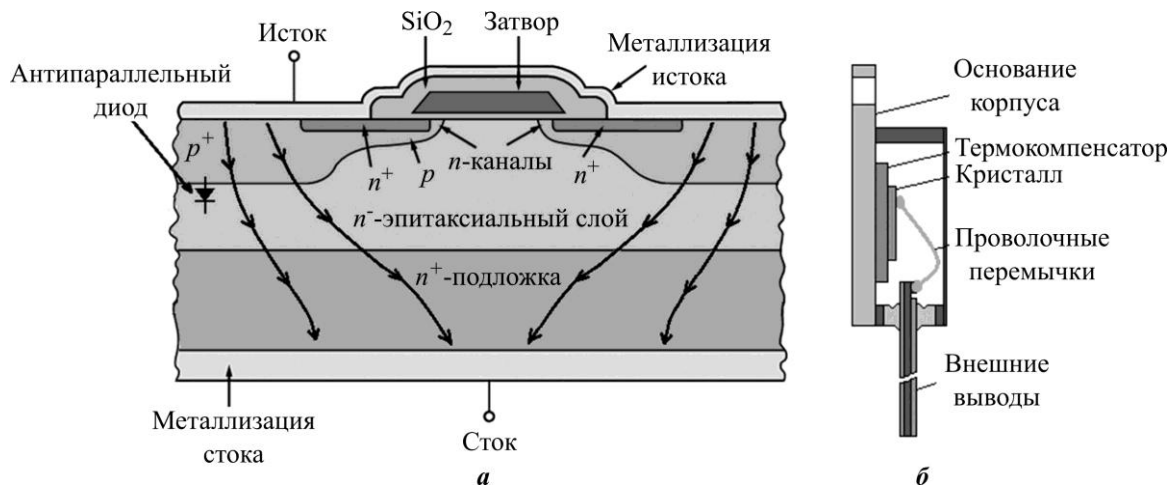


Рис. 1. Мощный MOSFET-транзистор: а – структура базовой ячейки; б – конструкция корпуса

Fig. 1. Power MOSFET base cell: a – base cell structure; b – case construction

напряжении между истоком и стоком $U_{СИ} > 0$ диод включен в обратном направлении и не оказывает никакого влияния на работу транзистора. Тем не менее антипараллельный диод может быть использован для измерения температуры перехода T_j . Согласно стандарту [3] для мощных MOSFET-транзисторов в качестве ТЧП рекомендовано использовать напряжение $U_{ИС}$ при закрытом канале транзистора. В этом случае небольшой измерительный ток $I_{изм}$ протекает в прямом направлении через антипараллельный диод MOSFET-транзистора, как это показано стрелками на рис. 1, а. Антипараллельный диод может быть использован также и для разогрева кристалла MOSFET-транзистора путем пропускания через него импульсов греющего тока [8]. В этом случае направления греющего $I_{гр}$ и измерительного $I_{изм}$ токов совпадают (от истока к стоку), что упрощает реализацию такого способа. В то же время добиться высокой точности измерения R_{Tjc} мощных транзисторов данным способом сложно. У многих объектов такого типа значение R_{Tjc} составляет менее 0,5 К/Вт. Для разогрева объекта на 20 °С, что рекомендуется стандартом [3], требуется тепловая мощность более 40 Вт. Учитывая, что падение напряжения на антипараллельном диоде около 1 В, амплитуда импульсов греющего тока должна быть не менее 40 А.

Коммутация такого тока в измерительном устройстве может сопровождаться помехами по цепям питания, влияющими на точность измерения R_{Tjc} . Решением проблемы может быть разогрев MOSFET-транзистора в активном режиме, когда греющие импульсы $I_{гр}$ протекают от стока к истоку через открытый канал, а измерение ТЧП в паузах между импульсами проводится путем пропускания $I_{изм}$ в обратном направлении, т. е. от истока к стоку. Это позволяет за счет увеличения напряжения $U_{си}$ достичь рассеиваемой в транзисторе мощности в десятки и сотни ватт.

Еще одна особенность измерения теплового сопротивления мощных MOSFET-транзисторов связана с измерением ТЧП в случае использования напряжения $U_{ис}$ на антипараллельном диоде. Поскольку при переключении транзистора из состояния нагрева в режим измерения ТЧП возникают переходные электрические процессы, то ТЧП необходимо измерять с некоторой временной задержкой τ_3 относительно окончания греющего импульса. Значения τ_3 для разных объектов могут существенно различаться. Как отмечалось ранее, исключить влияние τ_3 можно, экстраполируя результаты измерения ТЧП к моменту окончания каждого греющего импульса. В работе [10] показано, что процесс остывания $\Delta T_j(t)$ активной области кристалла по окончании греющего импульса описывается корневой зависимостью:

$$\Delta T_j(t) = \frac{2P}{A\sqrt{\pi c \rho \lambda}} \sqrt{t},$$

где P – рассеиваемая мощность; A – площадь теплового «пятна»; c , ρ и λ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность кристалла соответственно.

Линеаризуя данную зависимость, можно определить температуру перехода T_j непосредственно в момент окончания греющего импульса (в момент $t = 0$). Такой подход рекомендован стандартами [2, 3]. Следует отметить, что выражение для $\Delta T_j(t)$ получено в предположении «полубесконечного» кристалла с выделением тепла в тонком приповерхностном слое. Для мощного MOSFET-транзистора (см. рис. 1) это условие может не соответствовать действительности. Если нагрев транзистора проводится импульсами тока, протекающими от истока к стоку через антипараллельный диод, то тепло в основном рассеивается в области p^+-n^- -перехода, глубина залегания которого мала. Если нагрев транзистора проводится в активном режиме, когда канал транзистора открыт и импульсы тока протекают от стока к истоку, то рассеивание тепла происходит преимущественно в слаболегированном эпитаксиальном слое n^- -типа. Толщина этого слоя определяется значением напряжения пробоя и может быть относительно большой. В предельном случае, когда температура кристалла равномерно распределена по всей его толщине, кривая остывания $T_j(t)$ описывается выражением

$$T_j(t) = T_{j0} e^{-t/\tau},$$

где T_{j0} – температура кристалла при $t = 0$; τ – тепловая постоянная времени кристалл – корпус.

Использование в рассматриваемом случае для экстраполяции ТЧП корневой зависимости, рекомендуемой стандартами, может дать неверный результат. Для определения температуры перехода T_j в момент $t = 0$ целесообразно использовать линейную зависимость $\ln T_j(t)$ от времени t .

Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления. Для измерения теплового сопротивления мощных MOSFET- и IGBT-транзисторов разработан аппаратно-программный комплекс, функциональная схема которого представ-

лена на рис. 2. Работой всего комплекса управляет компьютер, из которого в микроконтроллер передается информационный пакет данных, определяющий режимы работы аппаратно-программного комплекса и параметры измерения. Микроконтроллер на основе полученных данных совместно с формирователем импульсов греющего тока генерирует последовательность импульсов заданной амплитуды и периода следования, а также частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в случае использования модуляционного метода. Установка амплитуды импульсов осуществляется с помощью цифрового потенциометра. Коммутация импульсов с заданным периодом и длительностью осуществляется с помощью электронного ключа и дифференциального усилителя. Формирователь импульсов сконструирован по стандартной схеме [11] на основе операционного усилителя, полевого транзистора и токозадающего резистора, что обеспечивает стабилизацию амплитуды греющих импульсов. Формирователь измерительного тока сконструирован по аналогичной схеме, но в нем сила тока $I_{изм}$ устанавливается вручную с помощью потенциометра. Система коммутации на основе мультиплексоров MUX1–MUX3 обеспечивает возможность измерения теплового сопротивления различных типов транзисторов, включая MOSFET-, IGBT-, HEMT- и биполярные транзисторы.

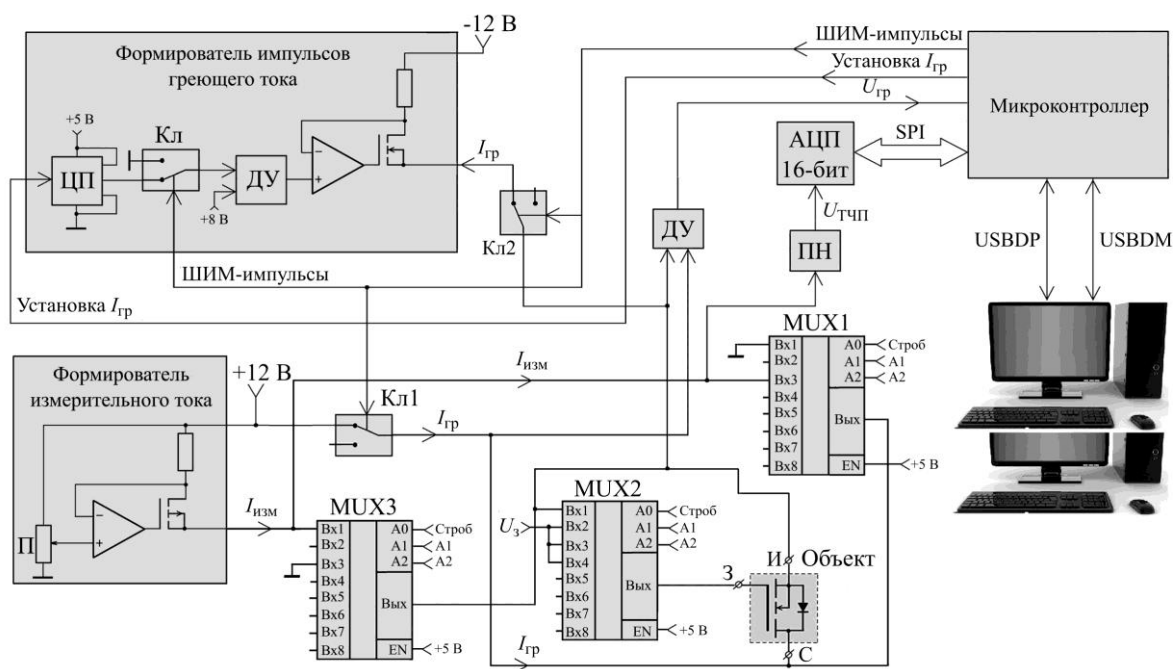


Рис. 2. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса: ЦП – цифровой потенциометр; Кл – электронный ключ; ДУ – дифференциальный усилитель; ПН – потенциометр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Fig. 2. Functional diagram of the hardware-software complex: ЦП – digital potentiometer; Кл – electronic key; ДУ – differential amplifier; ПН – potentiometer; АЦП – analog-to-digital converter

Напряжение на объекте $U_{гр}$ во время протекания через него $I_{гр}$ измеряется с помощью встроенного в микроконтроллер 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), напряжение $U_{тчп}$ в паузах между греющими импульсами – с помощью внешнего 16-разрядного АЦП. Обмен данными между внешним АЦП и микроконтроллером осуществляется посредством последовательного периферийного интерфейса SPI, а обмен данными между микроконтроллером и компьютером – посредством интерфейса USB.

Программное обеспечение аппаратно-программного комплекса позволяет пользователю устанавливать режимы его работы и параметры измерения с последующей передачей их из компьютера в микроконтроллер, принимать от последнего результаты измерений и обрабатывать их, представлять результаты обработки в удобном графическом формате, вести базу данных с результатами измерений, анализировать нештатные ситуации. В зависимости от установленного режима работы в аппаратно-программном комплексе формируются одиночные импульсы $I_{гр}$ или серии импульсов, последовательности импульсов с длительностью, изменяющейся по гармоническому закону или с нарастающей по логарифмическому закону длительностью. Есть возможность проведения производственных испытаний однотипных объектов и их отбраковки по значению теплового сопротивления, измерения прямой ветви ВАХ объекта и т. д.

Результаты измерения теплового сопротивления мощных MOSFET-транзисторов. С целью проверки работы аппаратно-программного комплекса и оценки его функциональных возможностей проведены измерения теплового сопротивления мощных MOSFET-транзисторов. Объект измерения – транзисторы IRF634 производства Vishay Siliconix (максимальная рассеиваемая мощность $P = 74$ Вт, максимальное тепловое сопротивление переход – корпус $R_{Tjc} = 1,7$ К/Вт). Для фиксации температуры корпуса транзистор крепили к радиатору посредством термопасты. Измерение компонент теплового сопротивления проводили модуляционным методом и модифицированным методом на основе ОСТ 11 0944-96 с предварительным измерением переходной тепловой характеристики.

При использовании модуляционного метода объект нагревали последовательно импульсами греющего тока с амплитудой 5 А и периодом следования 150 мкс. Длительность импульсов модулировали по гармоническому закону в диапазоне 37,5–102,5 мкс, частоту модуляции варьировали в диапазоне 0,02–500 Гц. Для определения компонент теплового сопротивления измеряли зависимость модуля $Z_T(v)$, фазы $\varphi(v)$ и вещественной части $\text{Re } Z_T(v)$ теплового импеданса от частоты модуляции v . Частотная зависимость $\text{Re } Z_T(v)$ представлена на рис. 3, а. По оси абсцисс указаны номера измерения, каждому из которых соответствует частота модуляции, показанная в текстовом окне. Особенностью зависимости $\text{Re } Z_T(v)$ является наличие на графике пологих участков и точек перегиба, связанных с элементами конструкции объекта, по которым распространяется тепловой поток от активной области кристалла через монтажный слой к корпусу и далее к радиатору и в окружающую среду.

Выявив особые точки на графике $\text{Re } Z_T(v)$, можно определить компоненты теплового сопротивления. Для решения данной задачи проводили обработку зависимости $\text{Re } Z_T(v)$, которая включала в себя сглаживание графика $\text{Re } Z_T(v)$ методом скользящего среднего и вычисление производной $[d(\text{Re } Z_T)/dv]^{-1}$ как функции переменной $\text{Re } Z_T$. Для вычисления производной в каждой точке дискретной зависимости $\text{Re } Z_T(v)$ рассчитывали коэффициенты линейной регрессии. Результат такой обработки представлен на рис. 3, б. На графике отчетливо проявляются три локальных максимума, каждый из которых соответствует определенной компоненте теплового сопротивления. Значения компонент теплового сопротивления, определяемые положением максимумов относительно оси абсцисс, составляют: $R_{T1} = 0,58$ К/Вт; $R_{T2} = 0,75$ К/Вт; $R_{T3} = 1,62$ К/Вт. Эти компоненты проявляются на частотах модуляции, равных соответственно 15,0; 5,6; 0,095 Гц. Значение R_{T3} соответствует компоненте теплового сопротивления переход – корпус, максимальное значение которого согласно техническому описанию на транзистор IRF634 равно 1,7 К/Вт. Остальные компоненты R_{T1} и R_{T2} связаны с соединительным слоем, посредством которого кристалл транзистора монтируется к корпусу

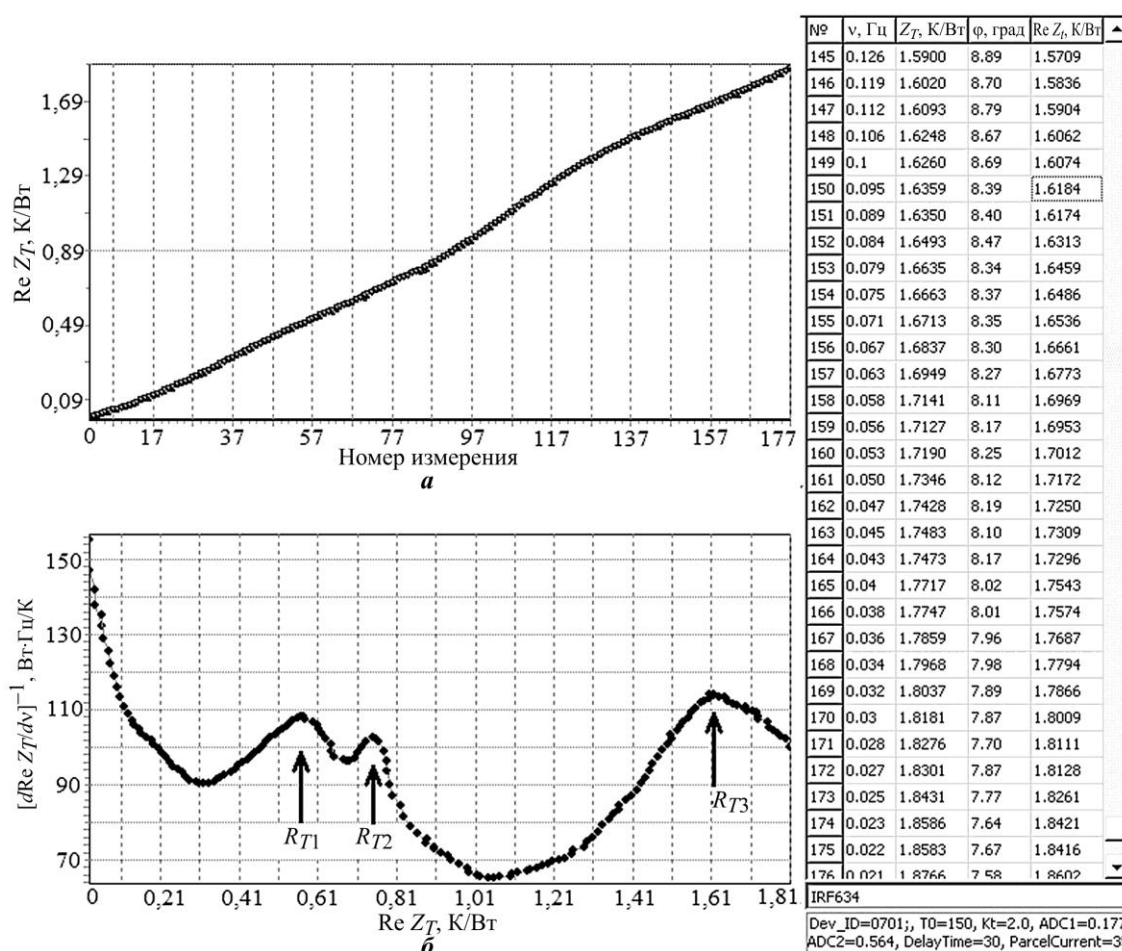


Рис. 3. Частотная зависимость $\text{Re } Z_T(\nu)$ (а) и результат ее обработки (б)
Fig. 3. Frequency dependence of $\text{Re } Z_T(\nu)$ (a) and the result of its processing (b)

(см. рис. 1, б). В мощных транзисторах кристаллы монтируются к основанию корпуса с использованием металлических сплавов, при этом часто используют пайку эвтектикой Au–Si. Вследствие малой пластичности эвтектики Au–Si и существенного различия температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) у кремниевого кристалла и материала основания корпуса в кристалле могут возникать механические напряжения. Для их уменьшения используют термокомпенсаторы из Mo или W, которые хорошо согласуются по значениям ТКЛР с Si [12]. Компоненты R_{T1} и R_{T2} связаны с наличием в монтажном слое компенсационной пластины.

При использовании метода измерения теплового сопротивления на основе ОСТ 11 0944-96 требуется устанавливать длительность импульсов греющего тока такой, чтобы температура кристалла транзистора достигала стационарного состояния, а температура корпуса оставалась неизменной. Для определения требуемой длительности импульсов греющего тока проводили измерения переходной тепловой характеристики, для чего через объект пропускали последовательность импульсов с нарастающей по логарифмическому закону длительностью τ . Скважность импульсов устанавливали равной 5. В паузах между импульсами измеряли температуру перехода T_j , что позволяло определить тепловой импеданс для каждого импульса. Результат измерения переход-

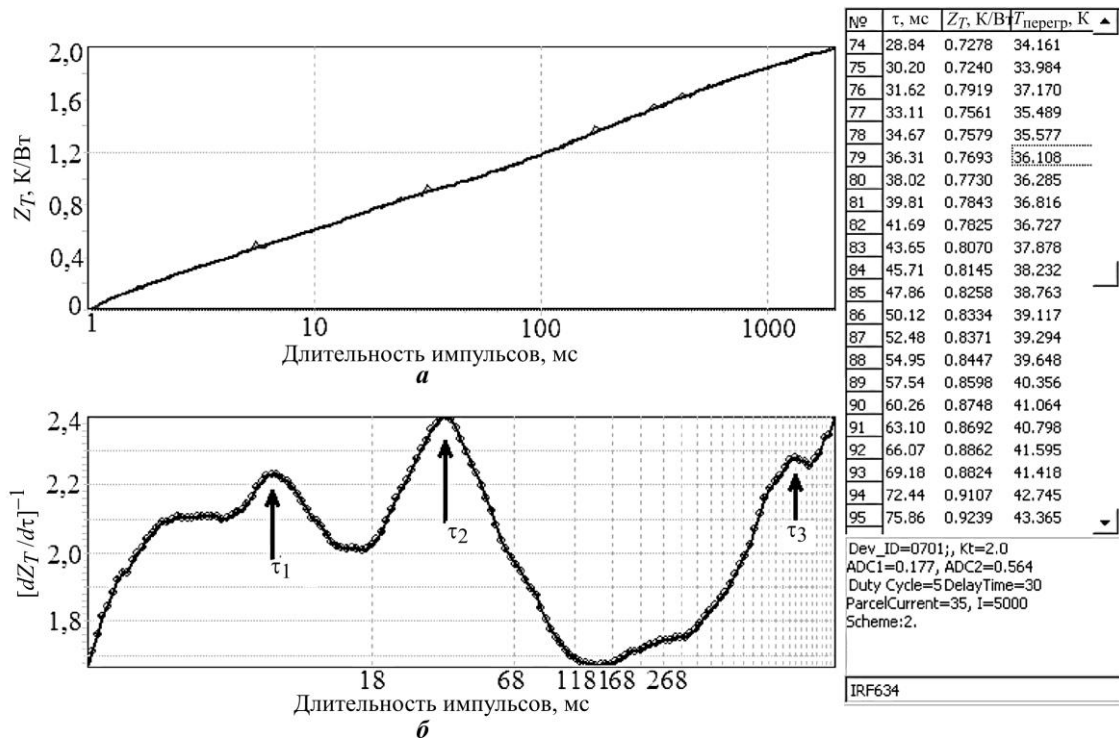


Рис. 4. Зависимость теплового импеданса $Z_T(\tau)$ от длительности греющих импульсов (а) и результат ее обработки (б)

Fig. 4. Dependence of the thermal impedance $Z_T(\tau)$ on the duration of the heating pulses (a) and the result of its processing (b)

ной характеристики представлен на рис. 4, а. На ней, как и у приведенного на рис. 3, а графика $\text{Re } Z_T(\nu)$, имеются пологие участки и точки перегиба, которые соответствуют тем или иным компонентам теплового сопротивления. Для их выявления проводили сглаживание графика и вычисление производной. Полученная таким образом зависимость $[dZ_T/d\tau]^{-1}$ от длительности импульсов τ показана на рис. 4, б. На полученном в результате обработки графике имеются три локальных максимума, соответствующие длительностям $\tau_1 = 8$ мс, $\tau_2 = 36$ мс и $\tau_3 = 912$ мс. Для каждого из полученных значений τ проводили исследования компонент теплового сопротивления на основе ОСТ 11 0944-96, которые включали в себя разогрев объекта последовательно импульсов греющего тока и измерение в паузах между ними ТЧП – напряжения $U_{ис}$ при напряжении на затворе $U_{зи} = 0$. Длительность импульсов устанавливали равной 912 мс, скважность – 5, амплитуда равна 5 А, время задержки составляло 30 мкс. Результат измерений показан на рис. 5. Значение компоненты теплового сопротивления, соответствующей длительности импульсов $\tau_3 = 912$ мс, составило $R_{T3} = 1,64$ К/Вт, что хорошо согласуется со значением $R_{T3} = 1,62$ К/Вт, полученным модуляционным методом. Результаты измерений, проведенных при $\tau = 8$ мс и $\tau = 36$ мс, равны 0,60 и 0,83 К/Вт соответственно, что также хорошо согласуется с результатами, полученными модуляционным методом.

Для исключения влияния на результат измерения компонент теплового сопротивления времени задержки, обусловленной переходными электрическими процессами в p - n -переходе транзистора, использовали экстраполяцию кривой остывания $T_j(t)$ к моменту окончания греющего импульса. Стандартами рекомендовано использовать корневой характер зависимости $T_j(t)$. Результат такой экстраполяции показан на вставке рис. 5. В случае, когда в результате протекания импульса греющего тока кристалл на-

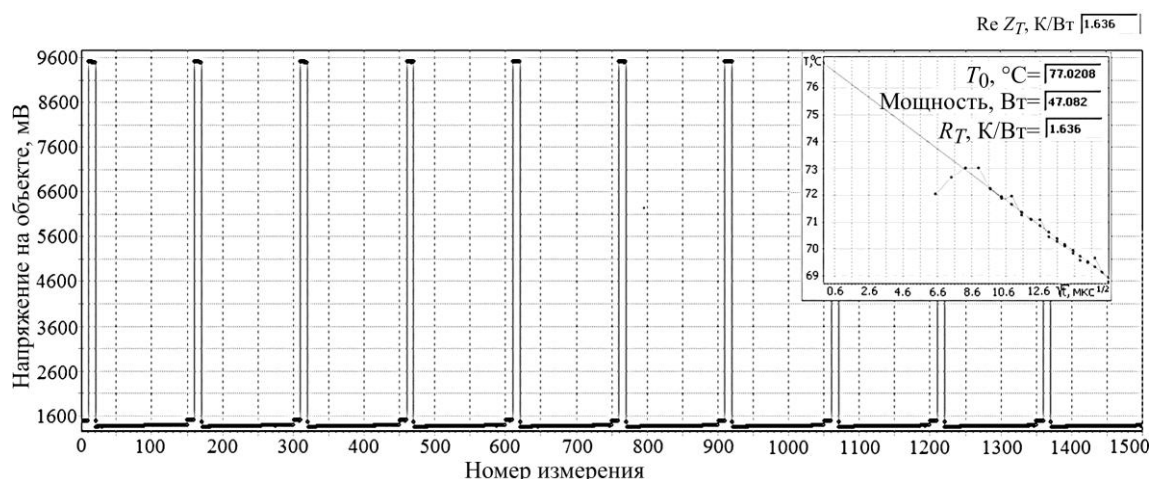


Рис. 5. Результат измерений R_{Tjc} модифицированным методом на основе ОСТ 11 0944-96 (вставка – экстраполяция $T_j(t)$ к моменту окончания импульса для корневой зависимости)

Fig. 5. The result of measurements of R_{Tjc} by the modified method based on the OST 11 0944-96 (inset – extrapolation of $T_j(t)$ to the end of the pulse for the root dependence)

гревается равномерно по всему объему, предпочтительнее использовать логарифмическую линеаризацию зависимости $T_j(t)$. Исследования показали, что в обоих случаях результаты измерения R_{Tjc} для транзистора IRF634 получаются близкими (1,64 и 1,57 K/Вт).

Заключение. Исследования теплоэлектрических свойств мощных MOSFET-транзисторов, проведенные с использованием аппаратно-программного комплекса, показали следующее:

- результаты измерений теплового сопротивления переход – корпус, полученные на основе стандарта ОСТ 11 0944-96 и модуляционным методом, хорошо согласуются между собой;
- аппаратно-программный комплекс позволил измерить не только компоненту теплового сопротивления переход – корпус, но и компоненты, связанные с наличием в монтажном слое компенсационной пластины, причем эти компоненты выявляются как модифицированным методом на основе ОСТ 11 0944-96, так и модуляционным методом;
- для исключения влияния длительности импульсов греющего тока на результаты измерения предложено предварительно измерять переходную характеристику и на ее основе определять оптимальную длительность импульсов для каждой компоненты теплового сопротивления;
- для исключения влияния времени задержки, обусловленной переходными электрическими процессами, использована экстраполяция измеренных значений ТЧП к моменту окончания импульсов греющего тока. Исследования показали, что использование для линеаризации корневой и логарифмической зависимостей ТЧП дают примерно одинаковый результат.

Литература

1. Смирнов В. И., Сергеев В. А., Гавриков А. А., Куликов А. А. Сравнительный анализ методов измерения теплового сопротивления нитрид-галлиевых НЕМТ-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 219–233. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-3-219-233>
2. ОСТ 11 0944 – 96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. М.: НПП «Пульсар», 1997. 110 с.

3. MIL-STD-750/3. Transistor electrical test methods for semiconductor devices: Department of Defense test method standard. Part 3: Test methods 3000 through 3999 // EverySpec [Электронный ресурс]. 03.12.2012. URL: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0700-0799/MIL-STD-750_3_40024/ (дата обращения: 28.06.2023).
4. *Smirnov V. I., Sergeev V. A., Gavrikov A. A., Shorin A. M.* Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices // *Microelectronics Reliability*. 2018. Vol. 80. P. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.11.024>
5. Thermal impedance measurements for vertical power MOSFETs (Delta source-drain voltage method): Addendum No. 3 to JESD24 // JEDEC [Электронный ресурс]. Nov. 1990. URL: <https://www.jedec.org/taxonomy/term/2101> (дата обращения: 28.06.2023).
6. Thermal impedance measurement for insulated gate bipolar transistors – (Delta $V_{CE(on)}$ method): JESD24-12 // JEDEC [Электронный ресурс]. June 2004. URL: https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=JESD24-12 (дата обращения: 28.06.2023).
7. Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction-to-case of semiconductor devices with heat flow through a single path: JESD51-14 // JEDEC [Электронный ресурс]. Nov. 2010. URL: https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=JESD51-14 (дата обращения: 28.06.2023).
8. *Smirnov V. I., Sergeev V. A., Gavrikov A. A., Shorin A. M.* Thermal impedance meter for power MOSFET and IGBT transistors // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33. No. 7. P. 6211–6216. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2740961>
9. Сравнительный анализ стандартного и модуляционного методов измерения теплового сопротивления мощных биполярных транзисторов / *В. И. Смирнов, В. А. Сергеев, А. А. Гавриков и др.* // Журнал радиоэлектроники [электрон. журн.]. 2019. № 1. Ст. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.3>. – EDN: TQRQHW.
10. *Oettinger F. F., Blackburn D. L.* Semiconductor measurement technology: Thermal resistance measurements. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1990. 78 p.
11. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 1. М.: Мир, 1993. 411 с.
12. *Ланин В. Л., Ануфриев Л. П.* Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов // *Силовая электроника*. 2009. № 2 (20). С. 94–99. EDN: MVRVFN.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 09.03.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Смирнов Виталий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и технологии электронных средств Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), ведущий научный сотрудник лаборатории УФ-2 Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48, стр. 2), smirnov-vi@mail.ru

Гавриков Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории УФ-2 Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48, стр. 2), a.gavrikoff@gmail.com

References

1. Smirnov V. I., Sergeev V. A., Gavrikov A. A., Kulikov A. A. Comparative analysis of methods for measuring the thermal resistance of gallium nitride HEMT-transistors. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 219–233. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-3-219-233>
2. *OST 11 0944 – 96. Integrated circuits and semiconductor devices. Methods of calculation, measurement and control of thermal resistance.* Moscow, NPP “Pul’sar” Publ., 1997. 110 p. (In Russian).
3. MIL-STD-750/3. Transistor electrical test methods for semiconductor devices: Department of Defense test method standard. Part 3: Test methods 3000 through 3999. *EverySpec*. 03.12.2012. Available at: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0700-0799/MIL-STD-750_3_40024/ (accessed: 28.06.2023).

4. Smirnov V. I., Sergeev V. A., Gavrikov A. A., Shorin A. M. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*, 2018, vol. 80, pp. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.11.024>
5. Thermal impedance measurements for vertical power MOSFETs (Delta source-drain voltage method): Addendum no. 3 to JESD24. *JEDEC*. Nov. 1990. Available at: <https://www.jedec.org/taxonomy/term/2101> (accessed: 28.06.2023).
6. Thermal impedance measurement for insulated gate bipolar transistors – (Delta $V_{CE(on)}$ method): JESD24-12. *JEDEC*. June 2004. Available at: https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=JESD24-12 (accessed: 28.06.2023).
7. Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction-to-case of semiconductor devices with heat flow through a single path: JESD51-14. *JEDEC*. Nov. 2010. Available at: https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=JESD51-14+ (accessed: 28.06.2023).
8. Smirnov V. I., Sergeev V. A., Gavrikov A. A., Shorin A. M. Thermal impedance meter for power MOSFET and IGBT transistors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 7, pp. 6211–6216. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2740961>
9. Smirnov V. I., Sergeev V. A., Gavrikov A. A., Kulikov A. A., Shorin A. M. Comparative analysis of standard and modulation methods for measuring thermal resistance of power bipolar transistors. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*, 2019, no. 1, art. no. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.3>. – EDN: TQRQHW.
10. Oettinger F. F., Blackburn D. L. *Semiconductor measurement technology: Thermal resistance measurements*. Gaithersburg, MD, National Institute of Standards and Technology, 1990. 78 p.
11. Horowitz P., Hill W. *The art of electronics*. 2nd ed. Cambridge, MA, Cambridge Univ. Press, 1989. 1125 p.
12. Lanin V. L., Anufriev L. P. Mounting of IGBT crystals. *Silovaya elektronika = Power Electronics*, 2009, no. 2 (22), pp. 94–99. (In Russian). EDN: MVRVFN.

The article was submitted 01.03.2023; approved after reviewing 09.03.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Vitaliy I. Smirnov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Design and Technology of Electronic Means Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets st., 32), Leading Researcher of the UV-2 Laboratory, Ulyanovsk Branch of the V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48, bld. 2), smirnov-vi@mail.ru

Andrey A. Gavrikov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the UV-2 Laboratory, Ulyanovsk Branch of the V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48, bld. 2), a.gavrikoff@gmail.com

Уважаемые авторы!

**С правилами оформления и опубликования научных статей
можно ознакомиться на нашем сайте:
<http://ivuz-e.ru>**

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Original article

УДК 621.382.049.77

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-5-612-620

EDN: SXFJLC

System for automated IC design based on generative adversarial and artificial deep neural networks

V. Sh. Melikyan^{1,2}, A. V. Vardumyan^{1,2}, A. G. Harutyunyan¹,
N. A. Asatryan^{1,2}, Sh. V. Melikyan³, E. Y. Karapetyan^{1,2}

¹National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia

²“Synopsys Armenia” CJSC, Yerevan, Armenia

³University of Bristol, Bristol, Great Britain

vardumya@synopsys.com

Abstract. Nowadays the IC design process is highly manual and relies on engineer's field knowledge for reasonable productivity. Technology shrinking has led to higher impact of secondary effects on circuit performance characteristics, which ultimately complicated the design process even further, giving a rise to need for design automation tools. High accuracy simulation based heuristic swarm intelligence methods combined with machine learning and artificial intelligence techniques allow the replacement of costly simulations with performance evaluations via neural networks, the accuracy of which relies on diversity and large quantities of training data that may not be readily available for most design problems. In this work, the IC design automation system is proposed incorporating a generative adversarial network with Wasserstein loss and gradient penalty coupled with Spearman's rank correlation coefficient matrix for guided generation of predictive network's training data. It was shown that the proposed system doesn't require huge amounts of data presence in advance; it uses deep neural network occasionally retrained during the optimization process, for performance evaluation and a genetic algorithm for global exploration of design search space. The designing of high-performance mixed logic line decoder and two-stage operational amplifier has demonstrated the viability of automated IC design system.

Keywords: artificial neural network, generative adversarial network, automated circuit optimization, circuit performance modeling

Funding: the work has been supported by the Science Committee of the Republic of Armenia (project no. 21T-2B002).

For citation: 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. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 612–620. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-5-612-620](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-612-620). – EDN: SXFJLC.

Научная статья

Система автоматизированного проектирования ИС, основанная на генеративно-сопоставительной и искусственной глубокой нейронных сетях

**В. Ш. Меликян^{1,2}, А. В. Вардунян^{1,2}, А. Г. Арутюнян¹,
Н. А. Асатрян^{1,2}, Ш. В. Меликян³, Э. Е. Карапетян^{1,2}**

¹Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван, Армения

²ЗАО «Синописис Армения», г. Ереван, Армения

³Бристольский университет, г. Бристоль, Великобритания

vardumya@synopsys.com

Аннотация. В настоящее время проектирование ИС выполняется вручную и зависит от знаний инженера в данной области. Минимизация технологий привела к более сильному влиянию вторичных эффектов на рабочие характеристики схемы и в конечном счете еще более усложнила процесс проектирования, что обусловило необходимость автоматизации проектирования. Методы эвристического роевого интеллекта, основанные на высокоточном моделировании, а также методы машинного обучения и искусственного интеллекта позволяют заменить дорогостоящее моделирование оценкой производительности с помощью нейронных сетей, точность которых зависит от разнообразия и большого количества обучающих данных, не доступных для большинства задач проектирования. В работе предложена система автоматизации проектирования ИС, включающая в себя генеративно-сопоставительную сеть с подсчетом потерь Вассерштейна и градиентным штрафом в сочетании с матрицей коэффициентов ранговой корреляции Спирмена для управляемой генерации обучающих данных для прогнозирующей сети. Показано, что система не требует наличия огромного количества данных, использует для оценки производительности глубокую нейронную сеть, которая переобучается в процессе оптимизации, а для глобального исследования поискового пространства – генетический алгоритм. Применение спроектированного высокопроизводительного декодера со смешанной логикой и двухкаскадного операционного усилителя показало работоспособность системы автоматизированного проектирования ИС.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, генеративно-сопоставительная сеть, автоматизированная оптимизация схем, моделирование характеристик схем

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке Республики Армения (проект № 21Т-2В002).

Для цитирования: Система автоматизированного проектирования ИС, основанная на генеративно-сопоставительной и искусственной глубокой нейронных сетях / В. Ш. Меликян, А. В. Вардумян, А. Г. Арутюнян и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 612–620. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-612-620>. – EDN: SXFJLC.

Introduction. Currently, the process of designing integrated circuits (ICs) comes down to correct identification of circuit components' sizing parameters, that will yield circuit topology acceptable for imposed design constraints. The process heavily relies on engineer's level of expertise and knowledge of complex input/output relations and dependencies of the circuit at hand. That gets even more sophisticated for circuits designed in low technological nodes where consideration of secondary effects, e.g. unwanted parasitic structures, thermal noise, non-idealities of production processes, leakage currents becoming comparable to primary characteristics, etc., becomes a paramount factor in decision making [1]. The fact that all of the size tuning operations, including trial and error cycles, are conducted manually dictates the necessity for CAD tools that will facilitate the design process.

Globally, the techniques used for automation of circuit parameter search can be divided into two broad categories: deterministic, which attempt to construct mathematical models to emulate circuit's behavior but suffer from limited accuracy, and simulation-based methods. The latter category incorporates evolutionary algorithms, swarm intelligence algorithms, etc., which rely on simulation data for respective phases of design search space exploration/exploitation. Since the nature of these algorithms is stochastic and convergence to global minimum can never be guaranteed, the sheer number of conducted simulations may exceed the allotted time and machine resource budget before detecting an acceptable design candidate.

As recent literature indicates, a great number of studies have been conducted in an attempt to utilize the advancements in machine learning and artificial intelligence in design of integrated circuits [2]. The latter field in particular, in the form of artificial neural networks (ANNs), has been incorporated into various systems in an effort to substitute the primary time-consuming bottleneck of the design process – SPICE simulations. In [3], the authors employ ANN with multiple hidden layers, also known as deep neural networks, to predict behavioral characteristics of an analog operational amplifier (OpAmp) and – by sweeping through the design space – identify circuit topologies that satisfy imposed design specifications. In [4], in addition to ANN a genetic algorithm (GA) [5] was aggregated into the system for the global search of potentially fruitful design candidates and exploit the GA's parallel evaluation capabilities of the entities inside population, thus enforcing implementational constraints on machines with multiprocessing capacities. On the other hand, in [6] a reverse approach is taken by proposing a network architecture to predict circuit device sizes subjected to design limitations and target characteristic values, requiring presence of already designed circuit topologies for proper ANN training.

The primary negative aspect of these techniques is the expectation of IC performance data availability in large quantities (generally thousands of entries) being equally distributed across entire search space, to organize accurate training process of the ANN, so that it can correctly identify and model the non-linearities in the circuit's behavior and make reasonably precise predictions for unseen data. Since each of those performance evaluations translate to separate SPICE simulations, such strategies are not efficient when applied to scenarios with no prior data access. Consequently, a need arises to fine-tune the ANN prediction system with a mechanism to automatically generate additional reasonable training data based on the limited number of simulated candidates, by learning probability distribution of circuit's "correct" performance and sampling from it.

Proposed method. In order to overcome the lack of sufficient quantities of training data, the proposal is to integrate a generative adversarial network (GAN) into the system combined with guiding correlation coefficient matrix obtained by analyzing dependencies present in available simulation data.

GANs are made up of two key components: generator G and discriminator D , each being implemented as multilayer perceptron [7]. Generator's target, being denoted as $G(z)$, is identification of distribution p_g over data x and mapping thereof to variable latent space input noise $p_z(z)$. On the contrary, the discriminator attempts to distinguish the data created by the generator from the original simulation entries and $D(x)$ represents the success probability. So, generator and discriminator are trained on contradicting objectives and compete against each other in a two-player minimax game expressed via following value function:

$$\min_G \max_D V(D, G) = E_{x \sim p_{data}(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim p_z(z)} [\log(1 - D(G(z)))].$$

In its classical implementation GAN's discriminator and generator parameters are updated to minimize the Jensen – Shannon divergence between $p_{data}(x)$ and $p_z(z)$, which in certain scenarios leads to vanishing gradients upon reaching saturation for discriminator, that ultimately results in instable behavior during training. To circumvent this obstacle a proposal was made to utilize the Wasserstein distance (also known as earth mover's distance) to quantify the divergence, owing to its nature being continuous everywhere and differentiable almost everywhere. In addition to that gradient penalization was added to discriminator's loss calculation principle to achieve stable performance [8]. After addition of all those factors the final loss equation for discriminator training becomes the following:

$$L_D = \nabla_w \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_w(G_\theta(z)) - D_w(x) + \lambda \left(\left\| \nabla_x D_w(\bar{x}) \right\|_2 - 1 \right)^2, \quad (1)$$

where $\bar{x} \leftarrow \varepsilon x + (1 - \varepsilon)G_\theta(z)$, ε being uniformly sampled within $[0, 1]$; w – the trainable parameters of discriminator network; θ – the set of generator's trainable parameters; $x \sim P_r$ – a sample of real data; $z \sim p(z)$ depicts the latent variable; λ – the penalty weight set to 10.

The loss calculation for the generator network is conducted on a sampled batch of latent variables $\{z^{(i)}\}_{i=1}^m \sim p(z)$ via following formula:

$$L_G = \nabla_\theta \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m -D_w(G_\theta(z)). \quad (2)$$

In the scope of this article, GAN architecture with Wasserstein loss and gradient penalty (WGAN-GP) was chosen for the automated circuit design system due to its stable training capabilities and facilitation of better convergence for considered models.

Depending on the amount of initially available simulation data, additional relational information about input/output characteristic variations and dependencies can be retrieved to further reinforce and guide the data generation process. To identify correlations between input transistor sizes and respective measurement values expressed in the form of coefficient matrix the Spearman's rank correlation coefficient (SRCC) was employed, the formula for calculating which is the following:

$$r_s = \rho_{R(X), R(Y)} = \frac{\text{cov}(R(X), R(Y))}{\sigma_{R(X)} \sigma_{R(Y)}},$$

where $R(X)$, $R(Y)$ – converted ranks of supposedly random (X_i, Y_i) pairs of scores among n observations; $\text{cov}(R(X), R(Y))$ – the covariance of the rank variables; $\sigma_{R(X)}$ and $\sigma_{R(Y)}$ – the standard deviations of those rank variables.

The complete flowchart of realized training data prediction module is shown in fig. 1. The discriminator and generator networks are made up of identical layer structure of 4 hidden layers with dropout regularization being added into the discriminator network. Adam optimizer was used for training both of them with discriminator conducting 3 more training steps per each generator step, the remaining hyperparameters were set according to paper recommendations [8].

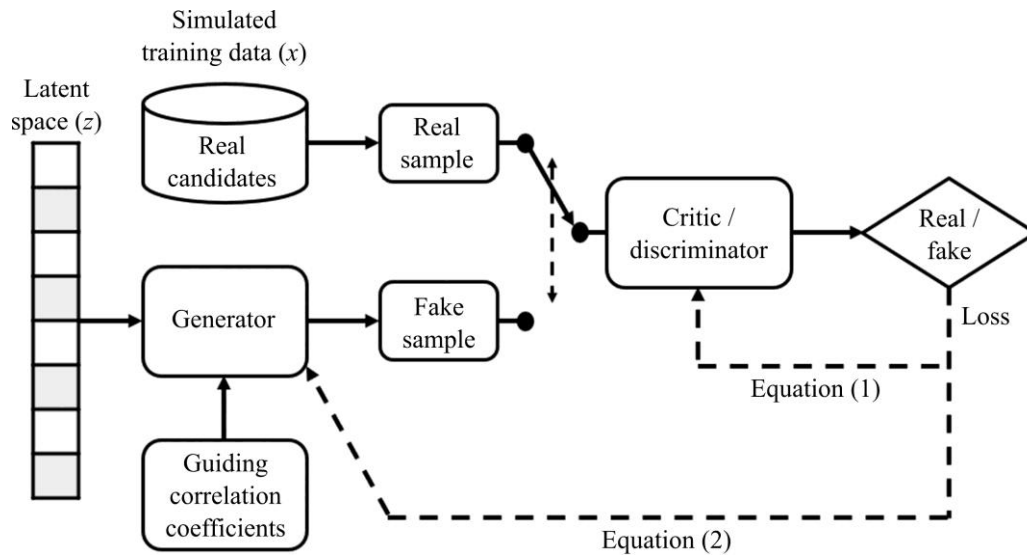


Fig. 1. Flowchart of training data generation module based on WGAN-GP

The flowchart of complete system is demonstrated in fig. 2, where each design candidate is comprised of length L , width W and number of “fingers” N_f parameters of each transistor that makes up the circuit. The orthogonal array based Latin hypercube sampling was utilized for initial population’s relatively uniform sampling across numerous dimensions of design search space. The predictor ANN model was constructed with 4 hidden layers, receiving a vector of design parameters in the input layer, and producing target measurement values at the output layer. Rectified linear unit activation was used for hidden layers with complementary dropout regularization to avoid overfitting during training, while linear activation is applied to output layer. Mean squared logarithmic error (MSLE) was used for training loss calculation with following formula:

$$L(y, \bar{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(y_i + 1) - \log(\bar{y}_i + 1))^2.$$

The specific characteristic of MSLE beneficial for IC design problems with one-sided constraints is the fact that it penalizes underestimates more than overestimates. To further assist the predictor’s training process, input data is normalized in range $[0,1]$, while the output nodes should estimate only fitness values instead of actual measurements, the aggregate sum of which is calculated as the sum of scaled norms between the specification and measured values:

$$F = \sum_{i=1}^N w \cdot e^{-\frac{2v_i}{v_i + LB_i}},$$

where v_i – the i th measured specification value among N targets; LB_i – corresponding lower bound within the specification; w – the weight factor to penalize for underperformance.

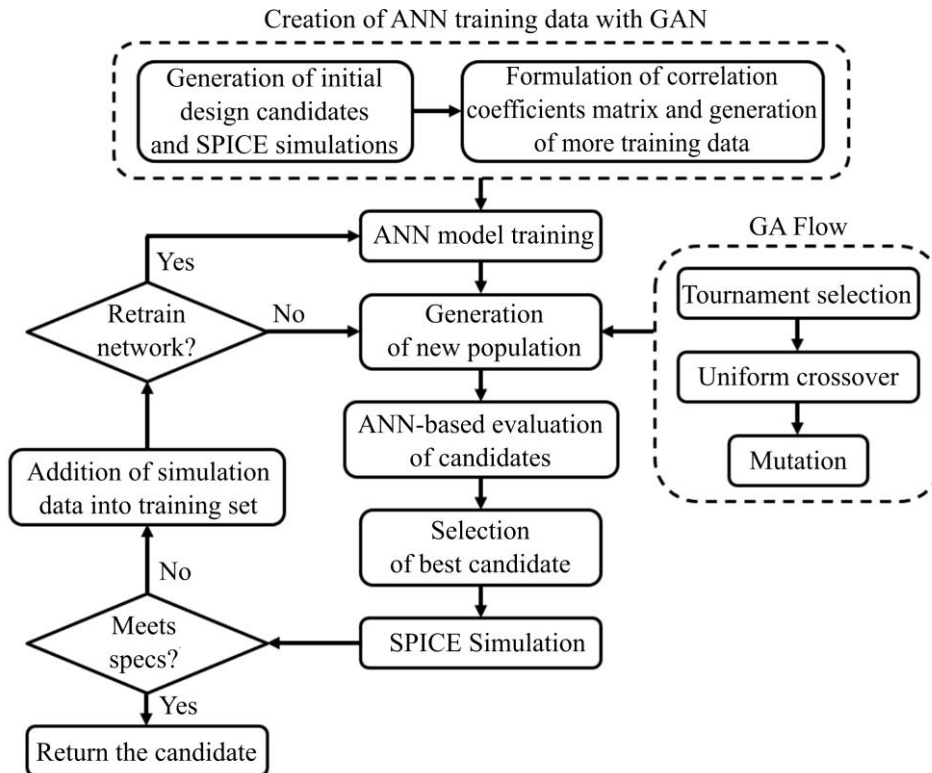


Fig. 2. Flowchart of the proposed system

To achieve high diversity across different generations GA was used, specifically the conjunction of tournament selection, uniform crossover, and multiple point mutation to achieve optimal global search. The entire system was implemented in Python programming language, neural networks were realized with TensorFlow library [9].

Experimental results. To evaluate the performance of the proposed system, two different categories of circuits are analyzed – high performance mixed logic line decoder [10] and two-stage OpAmp, simulations are conducted with HSPICE circuit simulator [11]. Fig. 3 depicts the decoder circuit with respective SRCC values matrix presented in a colormap form. The design constraints (considering 40ps input transition) and obtained best optimization results for 200 iterations and network retrain threshold set to 10 are summarized in table 1.

Table 1

Decoder design specifications and optimization results

Performance metric	Specification, ps	Value, ps	Performance metric	Specification, ps	Value, ps
Out ₀ T_{rise}	$40 \leq 50$	44.63	Out ₂ T_{rise}	$40 \leq 50$	43.47
Out ₀ T_{fall}	$40 \leq 50$	40.07	Out ₂ T_{fall}	$40 \leq 50$	48.52
Out ₀ $prop\ rise$	$0 \leq 10$	0.46	Out ₂ $prop\ rise$	$0 \leq 10$	3.18
Out ₀ $prop\ fall$	$0 \leq 10$	1.26	Out ₂ $prop\ fall$	$0 \leq 10$	1.44
Out ₁ T_{rise}	$40 \leq 50$	48.79	Out ₃ T_{rise}	$40 \leq 50$	40.29
Out ₁ T_{fall}	$40 \leq 50$	40.35	Out ₃ T_{fall}	$40 \leq 50$	42.64
Out ₁ $prop\ rise$	$0 \leq 10$	0.44	Out ₃ $prop\ rise$	$0 \leq 10$	2.51
Out ₁ $prop\ fall$	$0 \leq 10$	0.14	Out ₃ $prop\ fall$	$0 \leq 10$	3.42

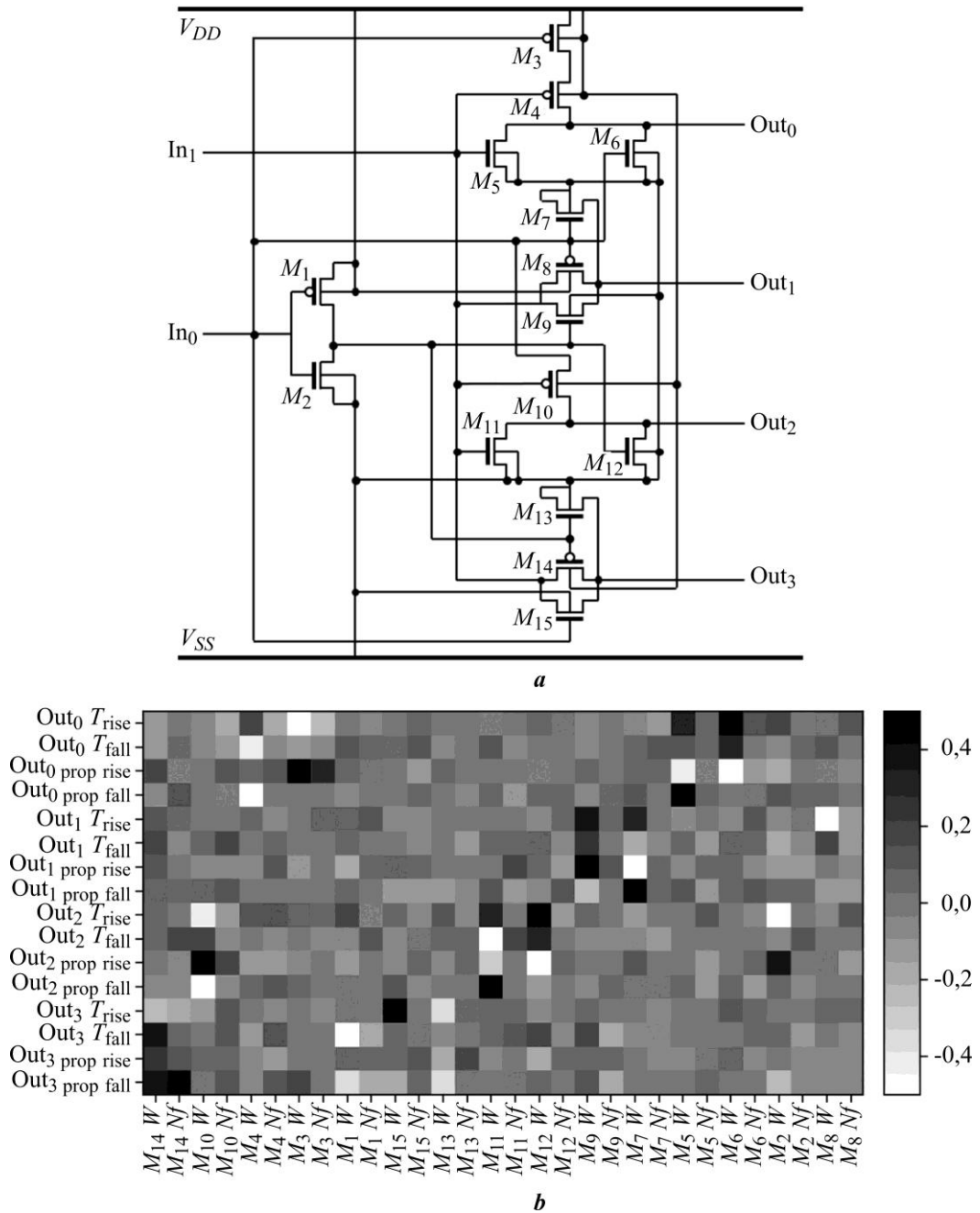


Fig. 3. Decoder circuit (a) with corresponding SRCC colormap matrix (b)

Fig. 4. represents the two-stage OpAmp circuit, being a conjunction of differential and common source amplifiers, and respective SRCC coefficient matrix (with M_1 and M_2 transistors constrained to have equal sizes), results of design optimization with identical setup are summarized in table 2.

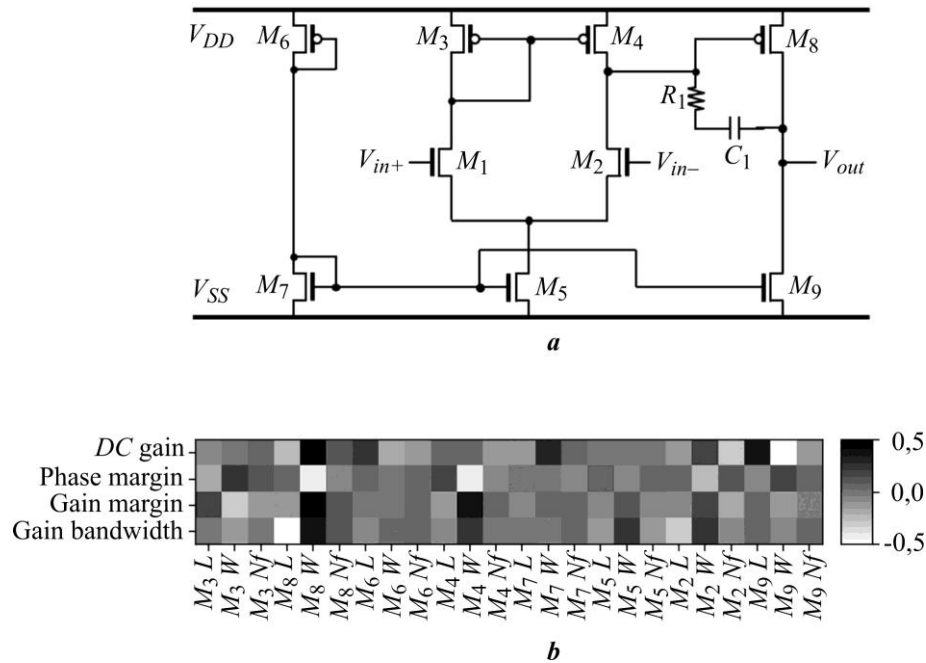


Fig. 4. OpAmp circuit (a) with corresponding SRCC colormap matrix (b)

Table 2

OpAmp design specifications and optimization results

Performance metric	Specification	Value
DC gain	≥ 50 dB	55.65
Gain bandwidth	≥ 350 MHz	355.3
Phase margin	$\geq 60^\circ$	68.72
Gain margin	≤ 0 dB	-25.77

Conclusion. Proposed system instead of conventional single predictor neural network incorporates two additional networks (thus tripling the quantity of model dependent hyperparameters) for supplementary training data generation based on already available limited simulation data. To further assist the process the covariance coefficient matrix compliance check has been added to the generator output to drop unrealistic samples. A complete circuit optimization system with embedded GA for global exploration of the search space is presented and validated on optimizing the high-performance mixed logic line decoder and two-stage OpAmp.

References

1. Razavi B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. 2nd ed. Noida, McGraw Hill India, 2017. 782 p.
2. Fayazi M., Colter Z., Afshari E., Dreslinski R. G. Applications of artificial intelligence on the modeling and optimization for analog and mixed-signal circuits: A review. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regul. Pap.*, 2021, vol. 68, no. 6, pp. 2418–2431. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2021.3065332>
3. Takai N., Fukuda M. Prediction of element values of OP Amp for required specifications utilizing deep learning. *2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*. Yogyakarta, IEEE, 2017, pp. 300–303. <https://doi.org/10.1109/ISESD.2017.8253353>
4. Lourenço N., Rosa J., Martins R., Aidos H., Canelas A., Póvoa R., Horta N. On the exploration of promising analog IC designs via artificial neural networks. *2018 15th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. Prague, IEEE, 2018, pp. 133–136. <https://doi.org/10.1109/SMACD.2018.8434896>

5. Haupt R. L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, vol. 37, no. 2, pp. 7–15. <https://doi.org/10.1109/74.382334>
6. Li Ya., Wang Y., Li Yu., Zhou R., Lin Z. An artificial neural network assisted optimization system for analog design space exploration. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2020, vol. 39, no. 10, pp. 2640–2653. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2019.2961322>
7. Goodfellow I. J., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative adversarial networks. *arXiv*. 2014. Available at: <https://arxiv.org/abs/1406.2661> (accessed: 10.07.2023).
8. Gulrajani I., Ahmed F., Arjovsky M., Dumoulin V., Courville A. Improved training of Wasserstein GANs. *arXiv*. 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1704.00028> (accessed: 10.07.2023).
9. Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Z., Davis A., Dean J., Devin M., Ghemawat S. et al. TensorFlow: A system for large-scale machine learning. *OSDI'16: Proceedings of the 12th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation*. Savannah, GA, USENIX, 2016, pp. 265–283.
10. Savalam C. S., Prasanti K., Haranath A. S. Design and implementation of high performance and low power mixed logic line decoders. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 8, iss. 6S4, pp. 635–640. <https://doi.org/10.35940/ijitee.F1131.0486S419>
11. *HSPICE Reference Manual*. Synopsys Inc., 2018. 968 p.

The article was submitted 20.02.2023; approved after reviewing 06.03.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Vazgen Sh. Melikyan – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Director of the University Programs, “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), vazgenm@synopsys.com

Arman V. Vardumyan – PhD student of the Automation Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Software Engineer, Eng. II, “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), vardumya@synopsys.com

Ashot G. Harutyunyan – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), harash@seua.am

Narek A. Asatryan – Master’s degree student of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Design Engineer of Analog and Mixed Signal Circuit, Eng. I, “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), anarek@synopsys.com

Shavarsh V. Melikyan – Student of the Faculty of Engineering (School of Computer Science, Electrical and Electronic Engineering and Engineering Mathematics), University of Bristol (UK, BS8 1UB, Bristol, Clifton, Woodland Road, Merchant Venturers Building), shavi2003@mail.ru

Erik Y. Karapetyan – Student of the Electronics, Micro- and Nanoelectronics Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Intern (Technical Engineering), “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), kerik@synopsys.com

Двумерное моделирование эмиттерного $p-n^+$ -перехода кремниевого $n-p-n$ -транзистора в прямоугольной и цилиндрической системах координат

Н. Л. Лагунович

Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, Беларусь

n_dudarby@tut.by

Аннотация. Повышение степени интеграции микросхем обусловило необходимость моделирования полупроводниковых структур, позволяющего предварительно рассчитать их конструктивно-технологические и электрофизические параметры и уменьшить тем самым количество натурных экспериментов. Часто $p-n$ -переход не только является основной активной частью приборов электронной техники, но и выполняет функции одной из областей приборных структур, например может быть эмиттерным переходом биполярного $n-p-n$ -транзистора. В работе проведен сравнительный анализ результатов двумерного моделирования кремниевого $p-n^+$ -перехода в двух системах координат: прямоугольной (декартовой) и цилиндрической. Для проведения технологического моделирования исследуемой $p-n^+$ -структуры и получения ее изображения применена программа TSuprem4, входящая в состав программного комплекса фирмы Synopsys. Приборное моделирование полученной $p-n^+$ -структуры как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат осуществлено с помощью программы Medici, также входящей в состав программного комплекса фирмы Synopsys. Получены значения электрофизических параметров исследуемого $p-n^+$ -перехода и построены его пробивные характеристики. Для рассматриваемой структуры разница в значениях конструктивно-технологических параметров при моделировании в двух системах координат составляет от 2,6 до 7,4 %, в значениях электрофизических параметров – от 1,0 до 1,5 %. Полученные различия в результатах вычислений незначительны. Следовательно, исследованную структуру можно моделировать в обеих системах координат с достаточно высокой степенью точности.

Ключевые слова: $p-n$ -переход, приборно-технологическое моделирование, система координат, конструктивно-технологический параметр, электрофизический параметр, ВАХ

Для цитирования: Лагунович Н. Л. Двумерное моделирование эмиттерного $p-n^+$ -перехода кремниевого $n-p-n$ -транзистора в прямоугольной и цилиндрической системах координат // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 621–628. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-621-628>. – EDN: QCKZLN.

Two-dimensional simulation of emitter $p-n^+$ junction of a silicon $n-p-n$ transistor in rectangular and cylindrical coordinate systems

N. L. Lagunovich

Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company, Minsk, Belarus

n_dudarby@tut.by

Abstract. An increase in the degree of integration of microcircuits has led to a growth in the need for simulation of semiconductor structures, which makes it possible to calculate their design, technological and electrical parameters preliminarily, thereby reducing the number of full-scale experiments. A $p-n^+$ junction is often not just a major active part of electronic technology devices, it can function as one of device structure areas, e. g. it can be an emitter junction in the bipolar $n-p-n$ transistor. In this work, comparative analysis of results of silicon $p-n^+$ junction two-dimensional simulation in two different types of coordinate systems, rectangular (Cartesian) and cylindrical, is performed. For process simulation and imaging of $p-n^+$ structure under study, the TSuprem4 program was used, which is a part of the Synopsys software package. Device simulation of obtained $p-n^+$ structure in both Cartesian and cylindrical coordinate systems was performed using the Medici program, also a part of the Synopsys software package. The values of physical parameters of $p-n^+$ structure under study have been obtained and its breakdown characteristics have been built. For the considered structure, the difference in the values of design and technical parameters at the simulation in both coordinate systems ranges from 2.6 to 7.4 % and in the values of physical parameters it ranges from 1.0 to 1.5 %. The obtained differences in calculation results are insignificant. Therefore, the structure under study can be simulated in both coordinate systems with sufficiently high degree of accuracy.

Keywords: $p-n$ junction, device and process simulation, coordinate system, design and technical parameter, physical parameter, volt-amps diagram

For citation: Lagunovich N. L. Two-dimensional simulation of emitter $p-n^+$ junction of a silicon $n-p-n$ transistor in rectangular and cylindrical coordinate systems. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 621–628. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-621-628>. – EDN: QCKZLN.

Введение. С ростом степени интеграции микросхем, уменьшением размеров приборов и элементов интегральных схем, повышением их сложности возрастает потребность в моделировании полупроводниковых структур [1, 2]. Моделирование позволяет предварительно рассчитать конструктивно-технологические и электрофизические параметры полупроводниковых структур и уменьшить тем самым количество натурных экспериментов. На сегодняшний день существуют различные программные комплексы для одно-, дву- и трехмерного приборно-технологического моделирования полупро-

водниковых структур [3, 4], получаемых как в дискретном, так и в интегральном исполнении. Часто $p-n$ -переход [5, 6] является основной активной частью приборов электронной техники, таких как диоды, стабилитроны, варисторы и т. д. [5–9], особенности работы которых зависят от приложенного напряжения, профиля распределения примесей и геометрии перехода. Однако существует ряд изделий электронной техники, в частности биполярные $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы [5, 6, 10], в которых $p-n$ -переход является лишь частью активной области структуры. Кроме того, $p-n$ -переходы могут быть частью и МДП-структур [5, 6], где выполняют функции истоковых и стоковых областей транзисторов.

В настоящей работе рассматривается эмиттерный $p-n$ -переход биполярного $n-p-n$ -транзистора, где p -область выполняет функции базы, а n^+ -область – функции эмиттера. Проводится сравнительный анализ результатов двумерного моделирования $p-n^+$ -перехода кремниевого биполярного транзистора, полученных после выполнения расчетов как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат.

Методы вычислений. Приборно-технологическое моделирование исследуемой структуры $p-n$ -перехода, полученной на основе кремния, выполняли с применением программного комплекса фирмы Synopsys [4] версии V-2003.12-0, куда входят программа для двумерного технологического проектирования TSuprem4 и программа для двумерного моделирования электрических характеристик прибора Medici. Программа TSuprem4 позволяет моделировать структуры $p-n^+$ -перехода по заданному технологическому маршруту и получать ее изображение с конкретными значениями размеров областей, слоев, удельных и поверхностных сопротивлений. Программа Medici позволяет осуществлять приборное моделирование структуры в прямоугольной и цилиндрической системах координат. В состав программного комплекса фирмы Synopsys [4] входят также визуализатор результатов моделирования TaurusVisual, с помощью которого выводятся на экран изображения структуры исследуемого перехода и его ВАХ, и программа подготовки эксперимента WorkBench, представляющая собой так называемую виртуальную фабрику по производству полупроводниковых схем и приборов [4].

Технологическое моделирование. В процессе получения кремниевого $n-p-n$ -транзистора структуру $p-n^+$ -перехода формировали методом ионного легирования примесью фосфора в область p -базы. Основные этапы маршрута изготовления $p-n^+$ -перехода следующие:

- формирование базы транзистора p -типа, легированной примесью бора концентрацией $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
- формирование эмиттера n^+ -типа методом ионного легирования фосфором дозой $\approx 4,06 \cdot 10^{15} \text{ ион/см}^2$ и энергией 60 кэВ в область базы.

Общий технологический маршрут изготовления кремниевого $n-p-n$ -транзистора, помимо двух приведенных технологических операций, включает в себя высокотемпературные обработки, которые могут повлиять на характеристики и параметры исследуемого $p-n^+$ -перехода:

- 1) отжиг при температуре 850 °С в течение 30 мин в среде O_2 ;
- 2) отжиг при температуре 850 °С в течение 60 мин в среде N_2 ;
- 3) отжиг при температуре 850 °С в течение 30 мин в среде O_2 (повторяется три раза).

По приведенному технологическому маршруту с помощью программы TSuprem4 [4] выполнено технологическое моделирование $p-n^+$ -перехода с целью его приборного моделирования в декартовой (рис. 1) и цилиндрической (рис. 2) системах координат.

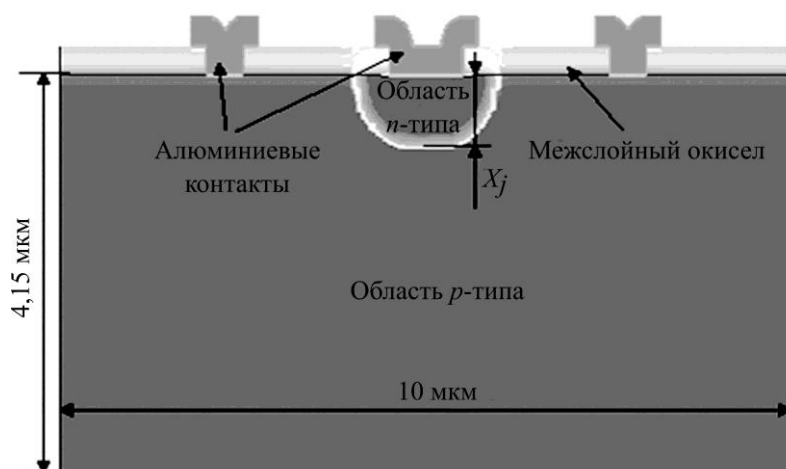


Рис. 1. Полная структура $p-n^+$ -перехода, полученная при моделировании в прямоугольной системе координат

Fig. 1. The complete structure of the $p-n^+$ junction obtained for device modeling in a Cartesian coordinate system

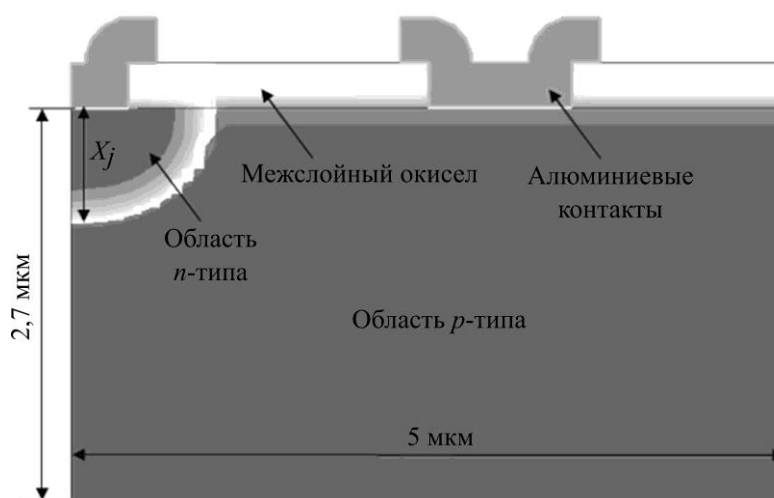


Рис. 2. Половина структуры $p-n^+$ -перехода, полученной при моделировании в прямоугольной и цилиндрической системах координат

Fig. 2. Half of the $p-n^+$ junction structure obtained for device simulation in both Cartesian and cylindrical coordinate systems

Для приборного моделирования в цилиндрической системе координат использовали структуру, изображенную на рис. 2. К ней для полноты численного эксперимента также применяли приборное моделирование в прямоугольной системе координат. Программа Medici в процессе расчетов в цилиндрической системе координат выполняет их для конструкции, которая образуется путем вращения структуры, полученной после технологического моделирования. Следовательно, размер исследуемого $p-n^+$ -перехода при моделировании в указанной системе координат должен быть равен половине размера такого же перехода для моделирования в прямоугольной системе координат. Та-

ким образом, координаты областей моделируемой структуры необходимо было задать так, чтобы в результате технологического моделирования получить не полную структуру, а ее половину. В этом случае данные, рассчитанные в результате проектирования в двух системах координат, можно считать соответствующими друг другу.

Площади структур, полученных для приборного моделирования в прямоугольной и цилиндрической системах координат, значительно отличаются друг от друга. В программном комплексе фирмы Synopsys размер конструкции, формируемой в процессе моделирования по заданному технологическому маршруту, вдоль оси Z по умолчанию равен 1 мкм. Следовательно, площадь полной структуры (см. рис. 1) в планарной плоскости равна 10 мкм^2 , площадь половины структуры составляет 5 мкм^2 . Конструкция, представленная на рис. 2, задана для приборного моделирования еще и в цилиндрической системе координат, в которой площадь планарной поверхности составила $\approx 78,5 \text{ мкм}^2$.

Результаты технологического моделирования $p-n^+$ -перехода, полученные для трех вариантов структур, показали следующее:

- удельное сопротивление ρ_v области p -типа для всех вариантов структур равно $0,062 \text{ Ом}\cdot\text{см}$;

- поверхностное сопротивление R_s области n^+ -типа для полной структуры $p-n^+$ -перехода, полученной в прямоугольной системе координат, равно $27 \text{ Ом}/\square$, для структур $p-n^+$ -перехода, полученных в прямоугольной и цилиндрической системах координат, равно $25 \text{ Ом}/\square$;

- расчетная глубина залегания $p-n^+$ -перехода X_j для полной структуры равна $0,74 \text{ мкм}$, для структур, полученных в прямоугольной и цилиндрической системах координат, равна $0,76 \text{ мкм}$.

Таким образом, в результате моделирования в двух системах координат разница в значениях R_s невелика и составляет $2 \text{ Ом}/\square$ ($\sim 7,4 \%$), разница в значениях X_j составляет $0,02 \text{ мкм}$ ($\sim 2,6 \%$).

Результаты технологического моделирования, полученные с помощью TSuprem4, показали, что размер моделируемой части исследуемого $p-n^+$ -перехода оказывает большее влияние на значения его конструктивно-технологических параметров, чем тип системы координат, в которой выполняются вычисления. Полученные различия в значениях указанных параметров, вероятно, обусловлены погрешностями расчетов, а не заданным типом системы координат.

Приборное моделирование. Для получения ВАХ структур $p-n^+$ -перехода, сформированных в результате технологического моделирования (см. рис. 1 и 2), проведено их приборное моделирование, результаты которого представлены на рис. 3 и 4.

Площади рассматриваемых конструкций в планарной плоскости будут разными при моделировании их ВАХ в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Поэтому необходимо привести в соответствие результаты расчетов, реализованных в этих системах координат.



Рис. 3. Обратная ветвь ВАХ $p-n^+$ -перехода, полученной при моделировании в прямоугольной системе координат

Fig. 3. The breakdown characteristic of the observable $p-n^+$ -junction obtained as a result of simulation in a Cartesian coordinate system

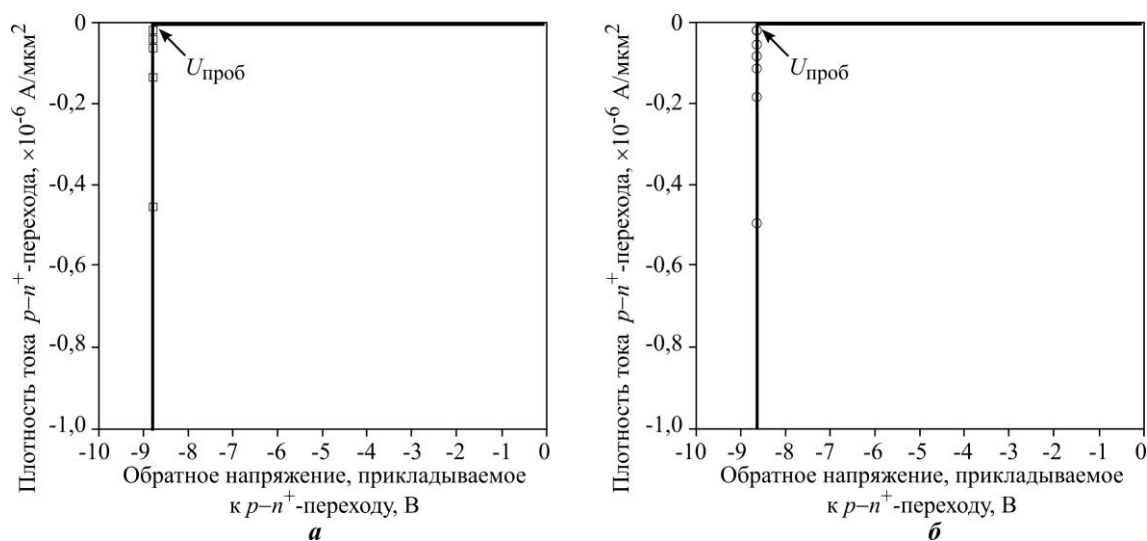


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ $p-n^+$ -переходов, полученных при моделировании в прямоугольной (а) и цилиндрической (б) системах координат

Fig. 4. The breakdown characteristics of the observable $p-n^+$ junction obtained as a result of modeling in Cartesian (a) and cylindrical (b) coordinate systems

С этой целью значения пробивных напряжений $U_{\text{проб}}$ исследуемого $p-n^+$ -перехода определяли при токах, протекающих через 1 мкм^2 его площади. Как видно из рис. 3 и 4, значения токов на пробивной характеристике $p-n$ -перехода, полученного в прямоугольной системе координат, отрицательные в отличие от значений токов на пробивных характеристиках $p-n^+$ -переходов, полученных в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Согласно рис. 1 металлические электроды к области базы p -типа расположены левее и правее электрода к эмиттеру n^+ -типа, а из рис. 2 следует, что контакт к области p -типа находится правее контакта к эмиттеру n^+ -типа. В программном комплексе Medici полярность прикладываемого напряжения смещения, а следовательно, и знаки токов, протекающих через структуру, определяются заданной последовательностью металлических контактов к областям. В рамках данной работы при обсуждении результатов моделирования речь идет об абсолютных величинах токов и напряжений, так как разницу в их полярностях автор считает несущественным фактором для данных исследований.

С помощью полученных в результате моделирования зависимостей плотности тока, протекающего через исследуемый $p-n^+$ -переход, от обратного напряжения смещения (см. рис. 3 и 4) посредством моделирования в Medici определены значения пробивных напряжений $U_{\text{проб}}$:

Полная структура $p-n^+$ -перехода, полученная в прямоугольной системе координат (при токе $1 \cdot 10^{-7} \text{ А/мкм}^2$)	8,74 В
Половина структуры $p-n^+$ -перехода, полученной в прямоугольной системе координат (при токе $2 \cdot 10^{-7} \text{ А/мкм}^2$)	8,78 В
Половина структуры $p-n^+$ -перехода, полученной в цилиндрической системе координат (при токе $\approx 1,27 \cdot 10^{-8} \text{ А/мкм}^2$)	8,65 В

Таким образом, результаты приборного моделирования свидетельствуют о том, что в отличие от технологического моделирования на значения электрических параметров большее влияние оказывает тип системы координат, в которой выполнены вычисления, а не размер моделируемой структуры. В частности, разница в значениях $U_{\text{проб}}$ полной

структуры и половины структуры $p-n$ -перехода, полученных в прямоугольной системе координат, составила 0,04 В (0,5 %). Значения $U_{\text{проб}}$ полной структуры $p-n$ -перехода, полученной в прямоугольной системе координат, и половины структуры $p-n$ -перехода, полученной в цилиндрической системе координат, различаются на 0,09 В (~ 1 %). Значения $U_{\text{проб}}$ половины структур $p-n$ -перехода, полученных в прямоугольной и цилиндрической системах координат, различаются на 0,13 В (~ 1,5 %).

Различия в значениях пробивного напряжения $U_{\text{проб}}$ исследованного $p-n^+$ -перехода незначительны независимо от выбранной системы координат, и ими можно пренебречь, т. е. моделирование, выполняемое с помощью программы Medici, характеризуется достаточно высокой степенью точности для расчетов как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат.

Заключение. В процессе технологического моделирования исследованного $p-n^+$ -перехода определены конструктивно-технологические параметры его областей, а приборное моделирование в прямоугольной и цилиндрической системах координат позволило оценить значения его электрофизических параметров, в том числе пробивного напряжения $U_{\text{проб}}$, в указанных системах координат. Установлено, что значение поверхностного сопротивления n^+ -области при моделировании в прямоугольной системе координат полной структуры $p-n^+$ -перехода на 2 Ом/□ (или на ~ 7,4 %) меньше, чем при моделировании половины $p-n^+$ -перехода в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Установлено также, что глубина залегания $p-n$ -перехода, полученная в результате расчетов параметров полной структуры $p-n^+$ -перехода в прямоугольной системе координат, на 0,2 мкм (или на ~ 2,6 %) меньше этого значения, рассчитанного при моделировании половины структуры $p-n^+$ -перехода как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат. Таким образом, при технологическом моделировании исследованного $p-n^+$ -перехода с применением программы TSuprem4 размер структуры оказывает большее влияние на расчетные значения параметров ее областей, чем тип системы координат, в которой проводились вычисления.

По результатам приборного моделирования с применением программы Medici установлено, что значение пробивного напряжения $U_{\text{проб}}$ при моделировании полной структуры в прямоугольной системе координат на 0,04 В (или на ~ 0,5 %) меньше, чем при моделировании ее половины в той же системе координат, но для случая расчетов в цилиндрической системе координат оно меньше на 0,09 В (~ 1 %). Кроме того, значение $U_{\text{проб}}$, полученное при моделировании половины структуры $p-n^+$ -перехода в прямоугольной системе координат, на 0,13 В (или на ~ 1,5 %) больше, чем значение $U_{\text{проб}}$ такой же структуры, полученное в цилиндрической системе координат. В случае приборного моделирования установлено, что на результаты вычислений большее влияние оказывает тип системы координат, чем размер исследуемой структуры.

Таким образом, различия, полученные в расчетных данных, незначительны, т. е. моделирование как в цилиндрической, так и в прямоугольной системах координат позволяет получать значения параметров с высокой степенью точности.

Литература

1. МОП-СБИС: Моделирование элементов и технологических процессов / под ред. **П. Антонетти и др.**; пер. с англ. В. Л. Кустова и др. М.: Радио и связь, 1988. 496 с.
2. **Абрамов И. И.** Лекции по моделированию элементов интегральных схем. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 148 с.
3. Silvaco [Электронный ресурс]. URL: <http://www.silvaco.com/> (дата обращения: 28.06.2023).
4. Synopsys [Электронный ресурс]. URL: <http://www.synopsys.com> (дата обращения: 28.06.2023).

5. **Зи С. М.** Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. 2-е изд., перераб. и доп. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
6. **Маллер Р., Кейминс Т.** Элементы интегральных схем / пер. с англ. Е. З. Мазеля, Л. С. Ходоша. М.: Мир, 1989. 630 с.
7. **Дудар Н. Л., Сякерский В. С., Корытко Н. Н.** Моделирование электрических характеристик и расчет конструктивных параметров кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 В // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2009. № 3. С. 10–12. EDN: RUMUHD.
8. **Дудар Н. Л., Борздов В. М., Корытко Н. Н.** Приборно-технологическое моделирование дискретного кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 В // *Электроника-инфо*. 2011. № 2. С. 77–80.
9. **Лагунович Н. Л.** Моделирование высоковольтного кремниевого диода, построение зависимостей его плотности тока от температуры // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2020. № 2. С. 22–28. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-2-22-28>. – EDN: DOCVDF.
10. **Dudar N. L., Borzdov V. M.** The simulation of PNP-transistor as an element of high-voltage integrated circuits by various parameters of epitaxial film // 8th Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium, St. Petersburg, Russia, September 17–20. 2010. P. 262–263.

Статья поступила в редакцию 09.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.05.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторе

Лагунович Наталия Леонидовна – кандидат технических наук, ведущий инженер Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Беларусь, 220108, г. Минск, ул. Корженевского, 12), n_dudarby@tut.by

References

1. Antognetti P., Antoniadis D. A., Dutton R. W., Oldham W. G., eds. *Process and device simulation for MOS-VLSI circuits*. Cham, Springer, 1983. 636 p. NATO Science Series E.
2. Abramov I. I. *Lectures on simulation of integrated circuits elements*. Moscow, Izhevsk, R&C Dynamics Publ., 2005. 148 p. (In Russian).
3. *Silvaco*. Available at: <http://www.silvaco.com/> (accessed: 28.06.2023).
4. *Synopsys*. Available at: <http://www.synopsys.com> (accessed: 28.06.2023).
5. Sze S. M. *Physics of semiconductor devices*. 2nd ed. noboken, NJ: Wiley, 1981. 868 p.
6. Muller R. S., Kamins Th. I. *Device electronics for integrated circuits*. 2nd ed. New York: Wiley, 1986. 524 p.
7. Dudar N. L., Syakerskiy V. S., Koritko N. N. The electric characteristics simulation and structural parameters calculation of Si-based stabilatron with stabilizing voltage 6.5 V. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2009, no. 3, pp. 10–12. (In Russian). EDN: RUMUHD.
8. Dudar N. L., Borzdov V. M., Koritko N. N. The device-technological simulation of the discrete Si based stabilatron with stabilizing voltage 6.5 V. *Elektronika-info*, 2011, no. 2, pp. 77–80. (In Russian).
9. Lagunovich N. L. High-voltage silicon diode simulation, the dependences of its current density from temperature construction. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2020, no. 2, pp. 22–28. (In Russian). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-2-22-28>. – EDN: DOCVDF.
10. Dudar N. L., Borzdov V. M. The Simulation of PNP-transistor as an element of high-voltage integrated circuits by various parameters of epitaxial film // 8th Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium, St. Petersburg, Russia, September 17–20. 2010. P. 262–263.

The article was submitted 09.03.2023; approved after reviewing 05.05.2023; accepted for publication 08.08.2023.

Information about the author

Nataliya L. Lagunovich – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of JSC “INTEGRAL”–“INTEGRAL” holding managing company (Belarus, 220108, Minsk, Korzhenevskii st., 12), n_dudarby@tut.by

Входные каскады программируемых быстродействующих операционных усилителей на основе базового матричного кристалла МН2ХА031

О. В. Дворников¹, В. А. Чеховский², Н. Н. Прокопенко³, В. Е. Чумаков³

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт», г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

³Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

prokopenko@sssu.ru

Аннотация. Операционный усилитель ОАmp9, разработанный на базовом матричном кристалле МН2ХА031, содержащем комплементарные биполярные транзисторы, позволяет программировать такие параметры, как ток потребления, максимальный выходной ток, полоса пропускания, скорость нарастания выходного напряжения. В работе описаны возможности дальнейшего увеличения максимальной скорости нарастания выходного напряжения операционного усилителя ОАmp9. Рассмотрено, как и для модифицированной схемы операционного усилителя ОАmp9.1, применение дифференцирующих цепей коррекции, которые форсируют процессы перезаряда паразитных емкостей в цепи базы выходных транзисторов входного каскада. При этом за счет увеличения обратного напряжения на изолирующих $p-n$ -переходах этих выходных транзисторов уменьшена их паразитная коллекторная емкость. Показан схемотехнический прием повышения быстродействия операционного усилителя на основе двух комплементарных «перегнутых» каскодов, который исключает динамическую перегрузку промежуточного каскада и ускоряет переходные процессы в режиме большого сигнала в модифицированной схеме операционного усилителя ОАmp9.2. Приведены электрические схемы и результаты сравнительного моделирования двух модифицированных входных каскадов в структуре операционных усилителей ОАmp9.1 и ОАmp9.2, которые характеризуются соответственно напряжением смещения нуля 0,08 и 0,11 мВ, коэффициентом усиления напряжения $1,4 \cdot 10^4$ и $1,4 \cdot 10^3$, произведением коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания 655 и 298 МГц, скоростью нарастания выходного напряжения 689 и 868 В/мкс.

Ключевые слова: быстродействующий операционный усилитель, максимальная скорость нарастания выходного напряжения, базовый матричный кристалл, комплементарные биполярные транзисторы

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-29-00637).

Для цитирования: Дворников О. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н., Чумаков В. Е. Входные каскады программируемых быстродействующих операционных усилителей на основе базового матричного кристалла MH2XA031 // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 629–641. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-629-641>. – EDN: QCJQXO.

Original article

Input stages of programmable high-speed operational amplifiers based on the master slice array MH2XA031

O. V. Dvornikov¹, V. A. Tchekhovskii², N. N. Prokopenko³, V. E. Chumakov³

¹“Minsk Scientific Research Instrument-Making Institute” JSC, Minsk,
Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

³Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

prokopenko@sssu.ru

Abstract. On the master slice array MH2XA031 containing complementary bipolar transistors an operational amplifier OAm9 has been developed. It allows programming a number of parameters, such as consumption current, maximum output current, bandwidth, and slew rate of output voltage. In this work, the potential of further increasing the maximum slew rate of the OAm9 output voltage is described. For its circuit, as well as for the modified OAm9.1 circuit, the application of differentiating correction networks that boost the processes of stray capacitors recharging in the base circuit of input stage output transistors, is considered. Thus due to increase of reverse voltage on insulating $p-n$ junctions of these output transistors their parasitic collector capacitance was decreased. A schematic technique to increase the operational amplifier response time based on two complementary “folded” cascodes, which eliminates the dynamic overload of the intermediate stage and accelerates the transient processes in a large signal mode in a modified OAm9.2 circuit, is shown. The electrical diagrams and results of comparative modeling of two modified input stages in the OAm9.1 and OAm9.2 structure have been presented. OAm9.1 and OAm9.2 are characterized by, respectively, a zero-offset voltage of 0.08 and 0.11 mV, a voltage gain of $1.4 \cdot 10^4$ and $1.4 \cdot 10^3$, a voltage gain on bandwidth of 655 and 298 MHz, and an output voltage slew rate of 689 and 868 V/ μ s.

Keywords: high-speed operational amplifier, maximum output voltage slew rate, master slice array, complementary bipolar transistors

Finding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-29-00637).

For citation: Dvornikov O. V., Tchekhovskii V. A., Prokopenko N. N., Chumakov V. E. Input stages of programmable high-speed operational amplifiers based on the master slice array MH2XA031. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 629–641. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-629-641>. – EDN: QCJQXO.

Введение. Операционные усилители (ОУ) с высокой скоростью нарастания выходного напряжения (Output Voltage Slew Rate, SR) широко применяются в электронной аппаратуре различного назначения, поэтому методам повышения максимального значения SR ОУ с классической архитектурой посвящено значительное количество работ [1–8]. Проведенные ранее исследования [9] показали, что целесообразно проектирование быстродействующих ОУ на базовом матричном кристалле (БМК) МН2ХА031, изготовленном по 3СВiТ-технологическому маршруту (ОАО «Интеграл», г. Минск, Беларусь), который обеспечивает формирование комплементарных биполярных транзисторов с высокой граничной частотой усиления. Так, на БМК МН2ХА031 разработаны два быстродействующих ОУ [9] с унифицированными каскадами и возможностью программирования параметров. В ОУ ОАmp9 значительно улучшены SR и произведение коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания (Gain Bandwidth Product, GBP).

В настоящей работе исследуются модернизированные схемы входных дифференциальных каскадов (ДК), позволяющие повысить быстродействие ОУ ОАmp9.1 и ОАmp9.2 на их основе.

Входной дифференциальный каскад ОУ ОАmp9. Электрическая схема входного ДК ОУ ОАmp9 [9] (ДК-1) приведена на рис. 1.

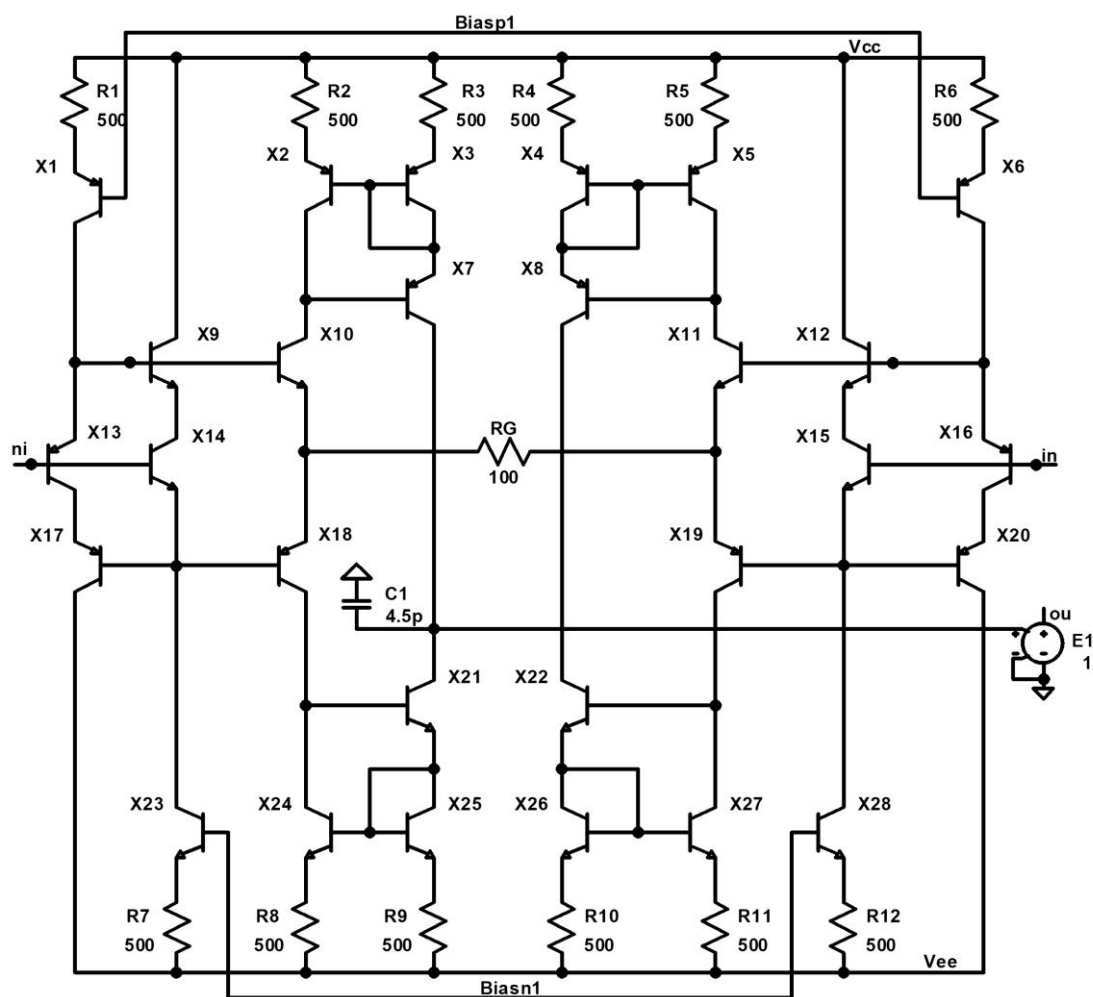


Рис. 1. Схема входного ДК-1 ОУ типа ОАmp9
Fig. 1. Circuit of the input differential stage DS-1 of OАmp9 type operational amplifier

Данное схемотехническое решение ДК-1 часто используется в быстродействующих ОУ разных поколений, например ОРА622, КМ432УД2, 154УД1/4, HA2700 [10]. По сравнению с классическими ДК [1] схема входного ДК-1 ОУ ОАmp9 может (в идеальном случае) обеспечивать существенное увеличение максимальной скорости нарастания выходного напряжения, так как [2]

$$SR = 2\pi f_1 V_{lim}, \quad (1)$$

где f_1 – частота единичного усиления скорректированного ОУ; V_{lim} – напряжение ограничения проходной характеристики входного каскада ОУ. Для схемы на рис. 1 [2]

$$V_{lim} \approx \beta I_{0p} RG + 4\phi_T < E^{(+)(-)}, \quad (2)$$

где β – усредненный коэффициент усиления по току базы транзисторов X10, X11, X18, X19; I_{0p} – статический ток источников опорного тока на транзисторах X1, X6, X23, X28; RG – сопротивление резистора, включенного между эмиттерами выходных транзисторов входного ДК-1 (X10, X11, X18, X19), образующих его мостовую схему; $\phi_T \approx 26$ мВ – температурный потенциал; $E^{(+)(-)}$ – напряжения питания ($V_{EE} = V_{CC}$).

Таким образом, повышение SR ОУ ОАmp9 при однополюсной передаточной функции связано, прежде всего, с увеличением его частоты единичного усиления f_1 , например за счет применения более высокочастотного технологического процесса и специальных высокочастотных схемотехнических решений. При этом существенное влияние на SR оказывает напряжение ограничения V_{lim} проходной характеристики его входного ДК-1, которое определяется произведением трех сомножителей (2). Однако необходимо отметить, что увеличение сопротивления резистора RG с целью повышения SR отрицательно сказывается на разомкнутом коэффициенте усиления ОУ.

На практике предельное значение SR_{max} в схеме ОУ ОАmp9 с ДК-1 не реализуется. Это связано с наличием паразитных емкостей C_{pi} в цепи базы каждого из выходных транзисторов X10, X11, X18, X19. Для получения предельных значений SR_{max} необходимо применять сверхвысокочастотные технологические процессы, например SiGe-технологии, обеспечивающие уменьшение паразитных емкостей C_{pi} , а также использовать более сильноточные режимы транзисторов X1, X6, X23, X28 и повышенное статическое напряжение между коллектором и базой.

Отметим, что схема на рис. 1 приведена без каких-либо упрощений и сокращений, за исключением выходного повторителя напряжения, выполненного на источнике напряжения, управляемого напряжением $E1$ с коэффициентом передачи, равным единице, и не показанного на рисунке блока смещения, задающего напряжения в узлах Biasn1, Biasp1, равные $V_{BIASN1} = -3,77$ В, $V_{BIASP1} = 3,77$ В. Это позволяет, с одной стороны, показать достаточность использования только двух имеющихся на БМК резисторов с сопротивлениями 1 и 2,45 кОм для получения требуемого отношения сопротивлений, а с другой стороны, непосредственно применять рассматриваемые ДК в других схемах. Транзисторы на схеме обозначены префиксом «X», что в соответствии с правилами LTSpice указывает на то, что эти элементы реализованы в виде подсхем. Применяемые подсхемы транзисторов позволяют адекватно учесть влияние паразитной емкости коллектора, которая подключена между коллектором и глобальным узлом *sub* в *n-p-n*-транзисторе и глобальным узлом *w* в *p-n-p*-транзисторе, соответственно соединенными при моделировании с отдельными источниками напряжения V_S и V_W . Одинаковые элементы на других схемах в разделах III и IV могут иметь одно и то же значение префикса, а емкость конденсатора C1, корректирующего амплитудно-частотную характери-

стику, остается постоянной, чтобы выявить относительное изменение динамических параметров ОУ при схемотехнической модернизации.

Входной дифференциальный каскад ОУ ОАmp9.1 с дифференцирующими цепями коррекции. На рис. 2 показана схема модернизированного ДК [11] в структуре ОАmp9.1 (ДК-2), в котором предусмотрено введение дополнительных корректирующих конденсаторов С2 и С3. Эти конденсаторы форсируют процесс перезаряда паразитных емкостей в цепях базы выходных транзисторов X10, X11, X18, X19 входного ДК-2 [11]. Как следствие, потенциал на базе выходного транзистора X10 имеет «более прямоугольную форму», что приводит к более быстрому изменению его тока эмиттера и тока эмиттера выходного транзистора X19. В результате интегрирующий корректирующий конденсатор С1 перезаряжается относительно большим импульсным током через С2 и С3, что повышает максимальную скорость нарастания выходного напряжения ОУ без увеличения тока потребления ОУ в статическом режиме. Данный положительный эффект обеспечивается за счет введения корректирующих конденсаторов С2 и С3 небольшой емкости.

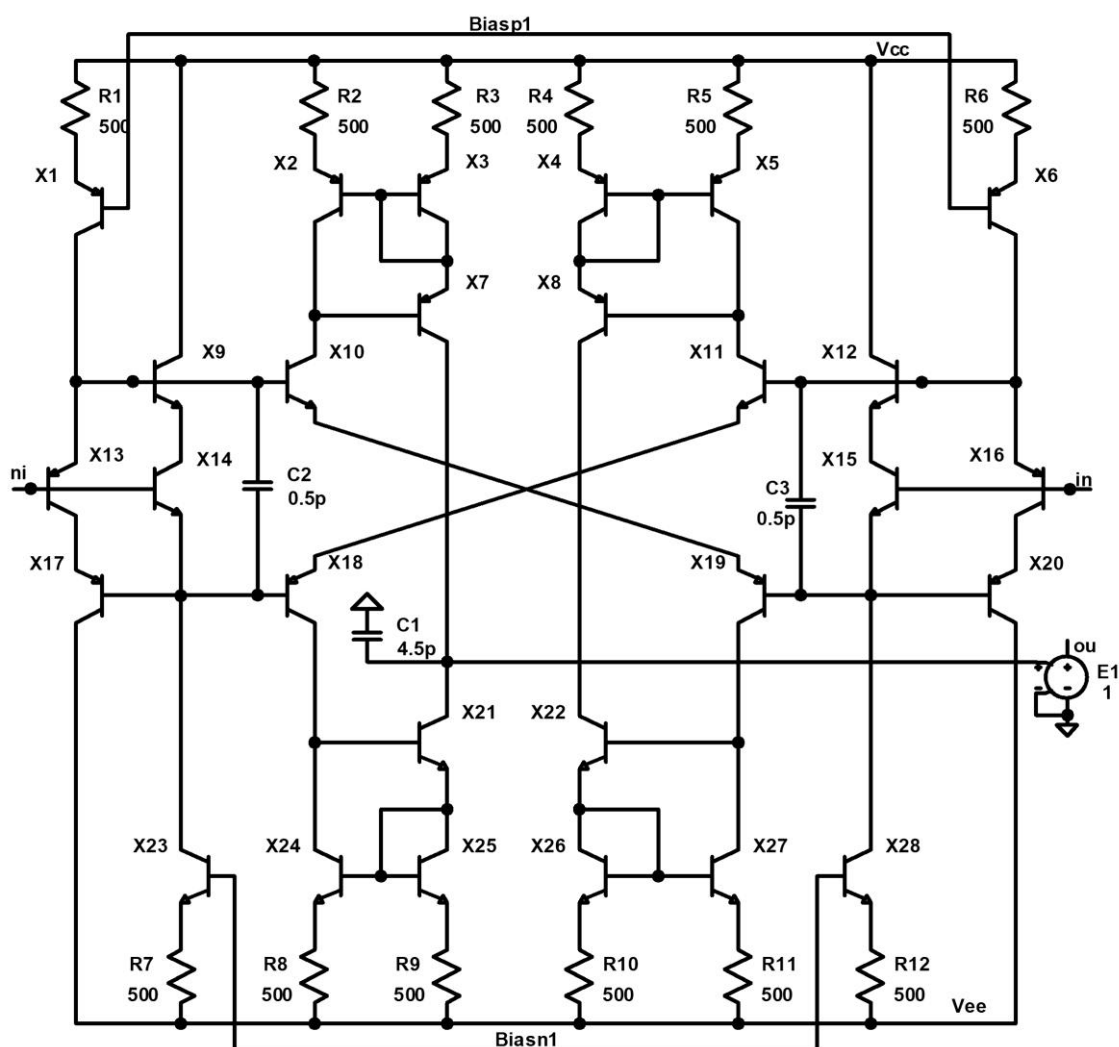


Рис. 2. Схема модернизированного входного ДК-2 ОУ ОАmp9.1

Fig. 2. Circuit of the updated input differential stage DS-2 of OАmp9.1 operational amplifier

При необходимости для ограничения максимального значения импульсного тока между эмиттерами выходных транзисторов X10 и X19 может включаться первый ограничивающий резистор. В свою очередь, для ограничения максимального выходного тока, перезаряжающего корректирующий конденсатор С1 при другой полярности входного импульсного сигнала, между эмиттерами выходных транзисторов X11 и X18 может включаться второй ограничивающий резистор.

Особенности дифференциального каскада ОУ ОАmp9.2 с двойным «перегнутым» каскодом. На рис. 3 представлена схема входного ДК в структуре ОАmp9.2 (ДК-3), токовые выходы которого, согласованные как с шиной положительного, так и с шиной отрицательного питания, управляют комплементарным промежуточным каскадом на двух «перегнутых» каскодах Q9–Q10, Q11–Q12. Такое схемотехническое решение относится к наиболее высокочастотным и поэтому перспективно для быстродействующих ОУ.

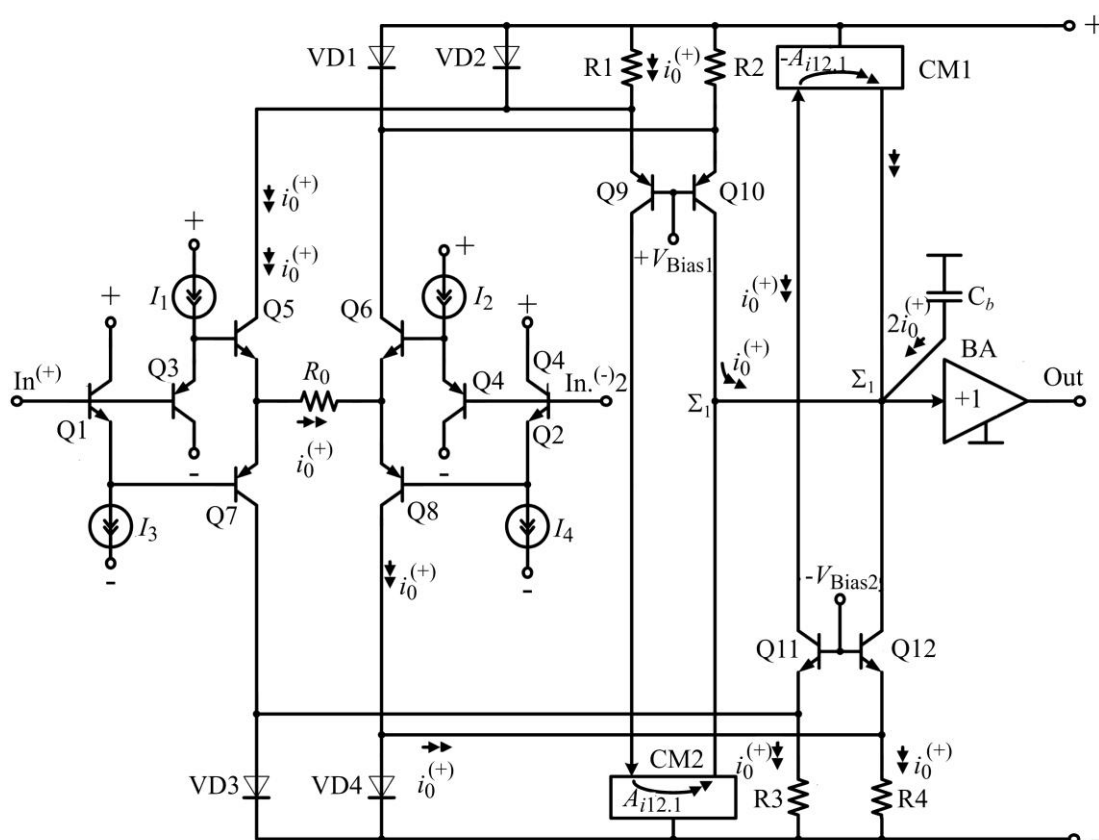


Рис. 3. Базовая схема быстродействующего ОУ с двойным «перегнутым» каскодом [10]

Fig. 3. Basic circuit of a fast-acting operational amplifier on two “folded” cascodes [10]

Однако данная схемотехника ОУ далека от оптимальных решений и не обеспечивает получение предельного быстродействия по SR. Это объясняется тем, что максимальные значения токов $i_{\text{вых max}}^{(+)}$, $i_{\text{вых max}}^{(-)}$, перезаряжающих конденсатор C_b , не выше, чем

$$i_{\text{вых max}}^{(+)} = \frac{E_c - 0,7 \text{ В}}{R_2}, \quad i_{\text{вых max}}^{(-)} = \frac{E_c - 0,7 \text{ В}}{R_1}, \quad (3)$$

где E_c – напряжение между положительной шиной питания и базами транзисторов Q9, Q10.

Таким образом, в схеме ОУ на рис. 3 максимальный выходной ток промежуточного каскада $i_{\text{вых max}}$ ограничивается на уровнях, определяемых формулами (3), что не позволяет получить предельные значения SR. Этот недостаток устраняется в архитектуре ОУ, схема которого показана на рис. 4. Данная схема содержит входной дифференциальный каскад, работающий в режиме класса АВ, и двухканальный комплементарный «перегнутый» каскод (Q9 и Q10, Q11 и Q12), определяющий процесс перезаряда емкости коррекции C_b .

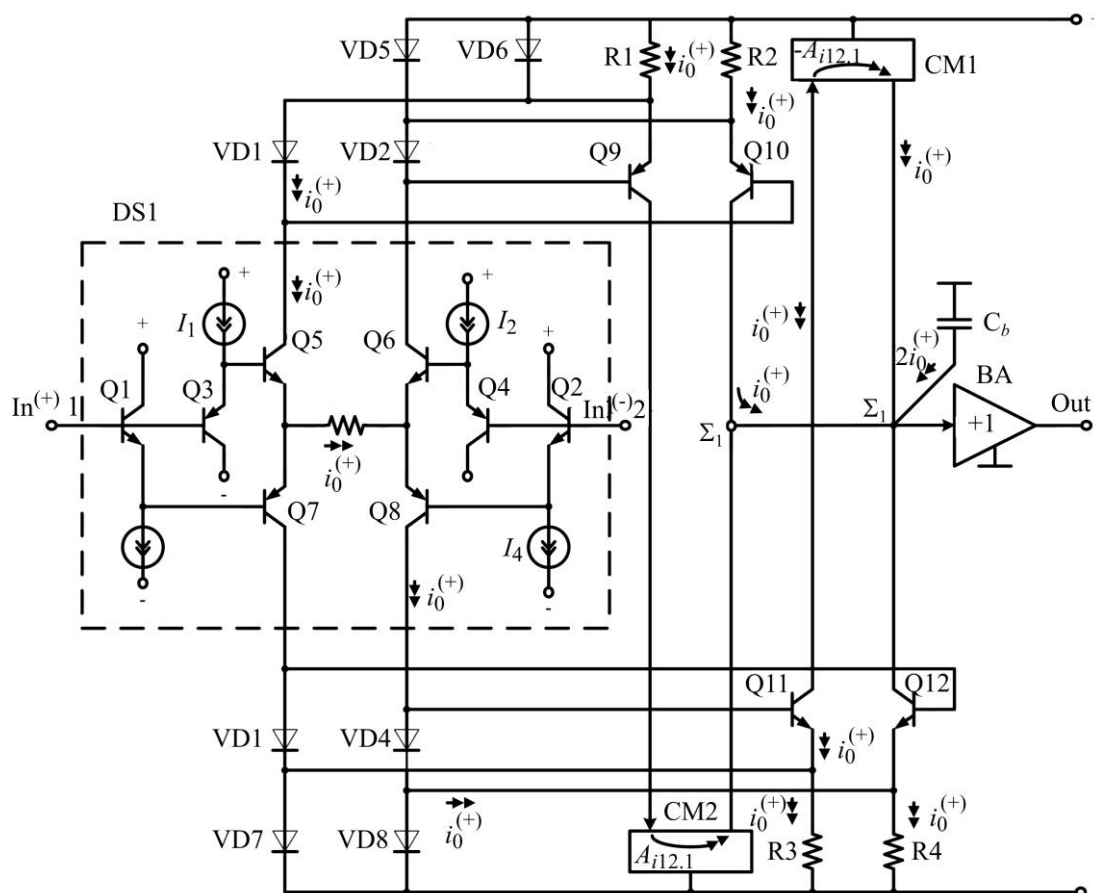


Рис. 4. Схема многоканального ОУ на комплементарных биполярных транзисторах
Fig. 4. Circuit of the multichannel operational amplifier on complementary bipolar transistors

Диоды VD5–VD8 (см. рис. 4) могут отсутствовать. Они ограничивают изменения напряжений на резисторах R1–R4 в режиме большого сигнала. На малом сигнале диоды VD5–VD8 не влияют на работу схемы ОУ, так как их токи крайне малы. Такое состояние диодов VD5–VD8 обеспечивается соответствующим выбором сопротивлений $R1 = R2$ и $R3 = R4$. Одна из существенных особенностей схемы ОУ на рис. 4 – более широкий по сравнению со схемой на рис. 3 диапазон линейной работы «перегнутого» каскода (транзисторы Q9 и Q10, Q11 и Q12), в пределах которого сохраняется пропорциональность тока, перезаряжающего емкость C_b , и входного дифференциального напряжения ОУ.

На рис. 5 приведена эквивалентная схема одного канала ОУ (см. рис. 4), характеризующая процесс передачи сигналов от входного ДК DS в высокоимпедансный узел Σ_1 промежуточного каскада для случая, когда выходной ток $i_{\text{вых 2}}$ ДК равен нулю.

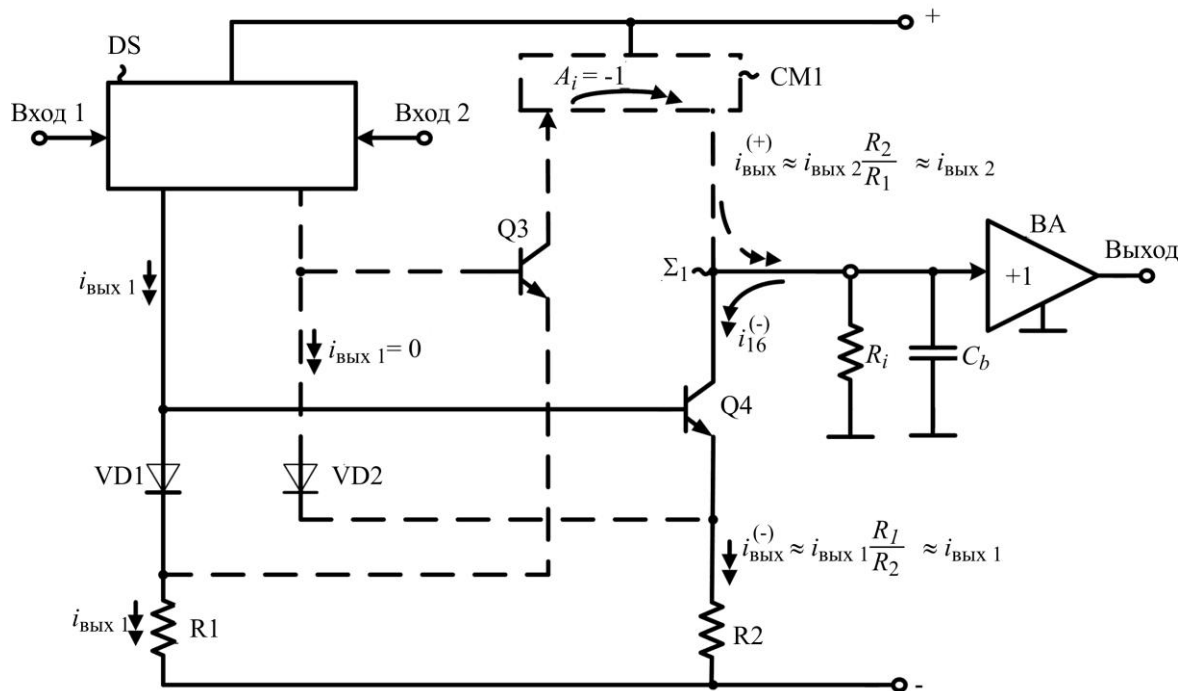


Рис. 5. Эквивалентная схема промежуточного каскада в режиме больших сигналов (пунктирной линией выделены элементы, находящиеся в отсечке и не влияющие на работу схемы ОУ)

Fig. 5. Equivalent circuit of a intermediate cascade in large-signal mode (dashed line indicates elements that are in the cut-off and do not affect the operation of the operational amplifier circuit)

При переходе из режима малого в режим большого сигнала в ОУ (см. рис. 5) изменяются пути передачи тока в эквивалентную нагрузку промежуточного каскада (R_i и C_b): транзистор Q3 запирается по эмиттерной цепи, а линейная (пропорциональная амплитуде $u_{\text{ВХ}}$ ОУ) передача тока $i_{\text{ВЫХ } 1}$ в высокоимпедансный узел Σ_1 промежуточного каскада обеспечивается токовым зеркалом на транзисторе Q4, резисторе R2, двухполюснике VD1 и резисторе R1:

$$i_{\text{ВЫХ}}^{(-)} \approx i_{\text{ВЫХ } 1} \frac{R_1}{R_2} \approx i_{\text{ВЫХ } 1}.$$

Аналогично для положительных выходных токов промежуточный каскад имеет вид

$$i_{\text{ВЫХ}}^{(+)} \approx i_{\text{ВЫХ } 2} \frac{R_2}{R_1} \approx i_{\text{ВЫХ } 2}.$$

Следовательно, при больших входных сигналах ОУ на рис. 4 не имеет традиционных ограничений выходного тока промежуточного каскада, характерных для классических «перегнутых» каскадов (см. рис. 3). В итоге это повышает быстродействие ОУ, которое зависит от скорости перезаряда корректирующего конденсатора C_b , и определяется диапазоном линейной работы подсхем, включенных между входами ОУ (Вход⁽⁺⁾1, Вход⁽⁻⁾2) и высокоимпедансным узлом Σ_1 . Однако на достижение предельных параметров по SR (1) в схеме на рис. 4 оказывают влияние численные значения паразитных емкостей в цепи базы каждого из выходных транзисторов Q5, Q6, Q7, Q8. Поэтому и в данном случае рекомендуется использовать схемотехнический прием – введение дифференцирующих конденсаторов C1, C2 между базами выходных транзисторов ДК-3. На рис. 6 показана схема модернизированного ДК-3 в структуре OAmr9.2, смоделированная в среде LTspice.

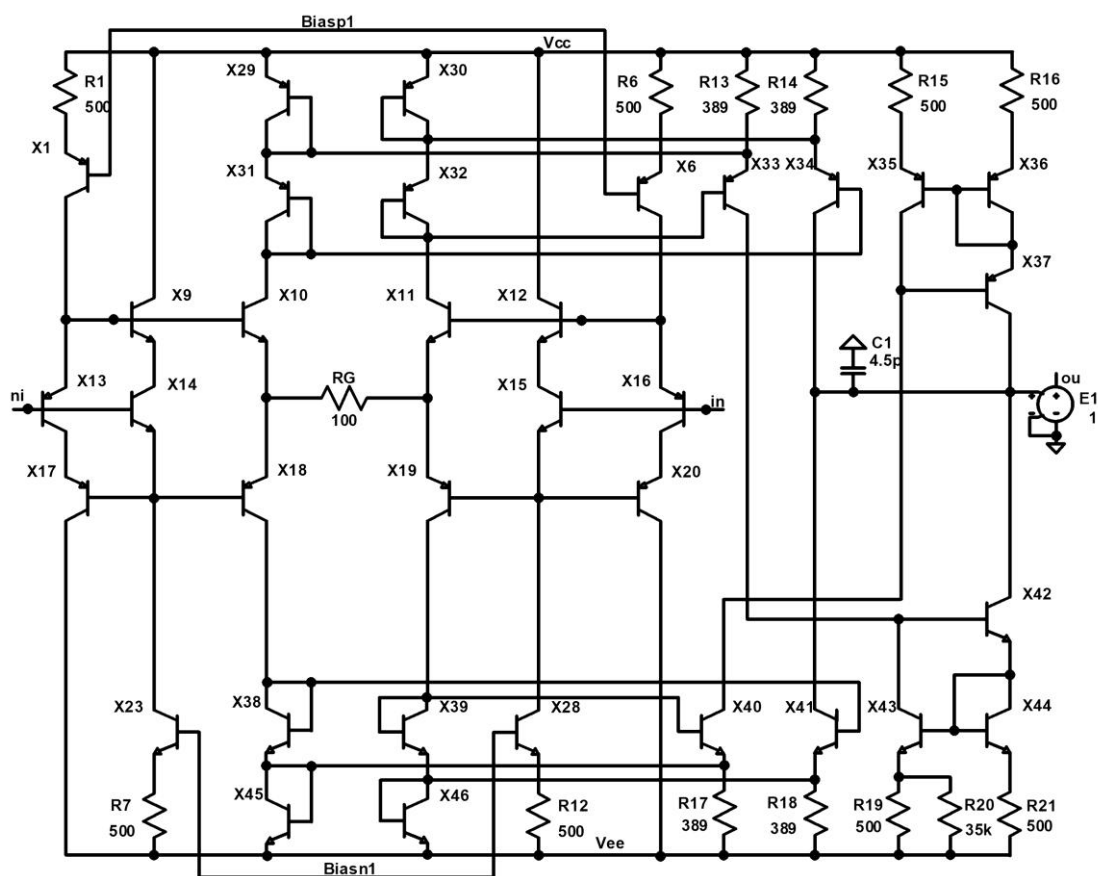


Рис. 6. Схема входного ДК-3 и ОУ на его основе

Fig. 6. Circuit of the input differential stage DS-3 and operational amplifier based on it

Результаты сравнительного моделирования быстродействующих ОУ с модернизированными входными каскадами. Результаты сравнительного моделирования ОУ OAm9, OAm9.1 и OAm9.2 с входными ДК-1, ДК-2 и ДК-3 соответственно приведены в таблице, а также на рис. 7 и 8. Все схемы рассмотренных ДК смоделированы с помощью программного обеспечения LTSpice. Напряжение смещения в узлах Biasn1, Biasp1 устанавливается блоком смещения, подробно рассмотренным в работе [9]. Указанные на схемах сопротивления резисторов получены последовательно-параллельным соединением имеющихся на БМК резисторов с сопротивлениями 1 и 2,45 кОм. Так, резистор R13 (см. рис. 6), сопротивление которого равно 389 Ом, представляет собой параллельное соединение 500-Ом резистора и двух 3,45-кОм резисторов.

Анализ результатов схемотехнического моделирования позволяет сделать следующие выводы:

– удаление резистора RG из схемы исходного ДК-1 на рис. 1 позволило увеличить в ОУ OAm9.1 на основе ДК-2 коэффициент усиления A_V в 3,5 раза и GBP в 2,4 раза. При этом запас по фазе на частоте единичного усиления уменьшился до недопустимо малого значения, равного 6,4 град. Как следствие, входной ДК-2 рекомендуется применять в ОУ, когда его замкнутый коэффициент усиления $A_V > 10$ и запас по фазе достаточно велик (71,4 град). В ином случае необходимо увеличить емкость конденсатора C1;

Основные значения параметров ОУ ОАmp9, ОАmp9.1 и ОАmp9.2
Basic parameter values of ОАmp9, ОАmp9.1 и ОАmp9.2 operational amplifier

Параметр	ОАmp9 с ДК-1	ОАmp9.1 с ДК-2	ОАmp9.2 с ДК-3
Напряжение питания V_{CC}/V_{EE} , В	-5/5	-5/5	-5/5
Ток потребления без блока смещения I_{CC} , мА	7,09	7,09	9,63
Напряжение смещения нуля V_{OS} , мВ	0,28	0,08	0,11
Коэффициент усиления напряжения A_V	$4,0 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^3$
Произведение коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания GBP (при $A_V = 1/10$), МГц	166/189	393/655	242/298
Минимальный запас по фазе в полосе пропускания $\Delta\phi$ (при $A_V = 1/10$), град	53,4/85,5	6,4/71,4	37,1/83
Максимальная скорость нарастания выходного напряжения SR_{max} (при $V_{CC} = V_{EE} = \pm 10$ В), В/мкс	599	689	868
Спектральная плотность напряжения шума e_N , отнесенная ко входу (при частоте 1 кГц), нВ/Гц ^{0,5}	2,64	1,45	2,50

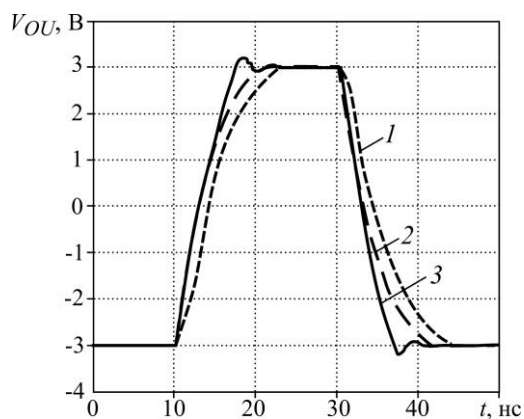


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения V_{OU} ОУ от времени t при $|V_S| = |V_W| = 10$ В:
 1 – ДК-1; 2 – ДК-2; 3 – ДК-3
 Fig. 7. Dependence of operational amplifier's output voltage V_{OU} on time t at $|V_S| = |V_W| = 10$ V:
 1 – DS-1; 2 – DS-2; 3 – DS-3

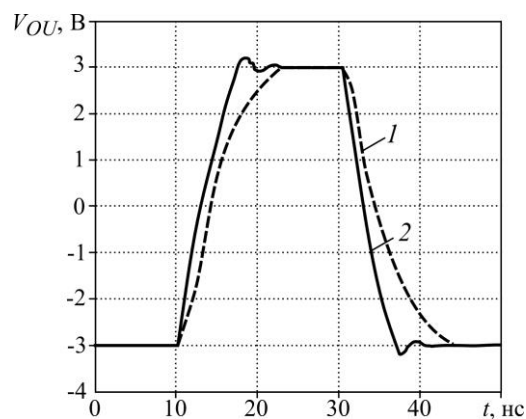


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения V_{OU} ОУ от времени t : 1 – ДК-1 при $|V_S| = |V_W| = 5$ В;
 2 – ДК-3 при $|V_S| = |V_W| = 10$ В
 Fig. 8. Dependence of operational amplifier's output voltage V_{OU} on time t : 1 – DS-1 at $|V_S| = |V_W| = 5$ V;
 2 – DS-3 at $|V_S| = |V_W| = 10$ V

– использование в ОУ ОАmp9.2 ДК-3 с активной нагрузкой X34, X41 увеличивает напряжение смещения нуля V_{OS} . Наиболее простым способом уменьшения V_{OS} является регулировка коэффициента передачи повторителя тока X43, X44 путем изменения сопротивления эмиттерного резистора R19 (его шунтированием дополнительным сопротивлением R20);

– уменьшение паразитной коллекторной емкости за счет увеличения обратного напряжения на изолирующих переходах транзисторов в ДК-1 и в модернизированных схемах ДК-2 и ДК-3 приводит к увеличению SR соответственно на 5, 21, 53 % по сравнению с ДК-1 при $V_S = V_W = 5$ В, для которого $SR = 568$ В/мкс;

– особенно значимо увеличение SR ОУ ОАmp9.2 с ДК-3 при $V_S = V_W = 10$ В по сравнению с исходной схемой ДК-1 при $V_S = V_W = 5$ В (см. рис. 8).

Заключение. Для элементов БМК МН2ХА031 модернизированы схемы входных каскадов (ДК-2, ДК-3) ОУ. Компьютерное моделирование ОУ ОАmp9.1 и ОАmp9.2 показало, что предлагаемые схемы ОУ на основе ДК-2, ДК-3 характеризуются различным сочетанием статических, динамических параметров и шумов: $A_V = 1,4 \cdot 10^4$ и $1,4 \cdot 10^3$; $V_{OS} = 0,08$ и $0,11$ мВ; $SR = 689$ и 868 В/мкс; $GBP = 655$ и 298 МГц при $A_V = 10$; $e_N = 1,45$ и $2,5$ нВ/Гц^{0,5}. Это позволяет выбрать необходимую схему входного каскада в зависимости от требований к заданным параметрам ОУ.

Литература

1. **Ivanov V. V., Filanovsky I. M.** Operational amplifier speed and accuracy improvement: Analog circuit design with structural methodology. New York: Springer, 2004. XIV, 194 p. <https://doi.org/10.1007/b105872>
2. **Прокопенко Н. Н., Будяков А. С.** Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей: монография. Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. 230 с.
3. **Close J.** High speed op amps: Performance, process and topologies // 2012 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). Portland, OR: IEEE, 2012. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/BCTM.2012.6352648>
4. **Bowers D. F., Wurcer S. A.** Recent developments in bipolar operational amplifiers // Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (Cat. No. 99CH37024). Minneapolis, MN: IEEE, 1999. P. 38–45. <https://doi.org/10.1109/BIPOL.1999.803521>
5. **Bales J.** A low-power, high-speed, current-feedback op-amp with a novel Class AB high current output stage // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1997. Vol. 32. No. 9. P. 1470–1474. <https://doi.org/10.1109/4.628768>
6. **Celma S., Perez F., Martinez P. A.** Compensating very high-speed current feedback op-amps // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Sensing, Processing, Networking (IMTC Proceedings). Ottawa, ON: IEEE, 1997. Vol. 2. P. 1293–1298. <https://doi.org/10.1109/IMTC.1997.612408>
7. **Sen S., Leung B.** A class-AB high-speed low-power operational amplifier in BiCMOS technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1996. Vol. 31. No. 9. P. 1325–1330. <https://doi.org/10.1109/4.535418>
8. **Xie L., Guo S., Li Z., Jin X.** A high speed rail-to-rail operational amplifier with constant-gm for LVDS receiver // 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). Nanning: IEEE, 2020. P. 1044–1048. <https://doi.org/10.1109/ICCT50939.2020.9295857>
9. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле / **О. В. Дворников, В. А. Чеховский, Н. Н. Прокопенко и др.** // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 1. С. 96–111. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111>. – EDN: QUUOLI.
10. Микромощные операционные усилители повышенного быстродействия // Операционные усилители и компараторы: справочник / подгот. В. Д. Авербух и др. М.: Додэка-XXI, 2001. С. 127.
11. **Prokopenko N. N., Dvornikov O. V., Zhuk A. A.** High-speed operational amplifier with differentiating transient correction circuits // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Tomsk: IEEE, 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SIBCON56144.2022.10002969>

Статья поступила в редакцию 13.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.03.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Дворников Олег Владимирович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт» (Беларусь, 220113, г. Минск, ул. Якуба Коласа, 73), oleg_dvornikov@tut.by

Чеховский Владимир Алексеевич – заведующий лабораторией электронных методов и средств эксперимента Института ядерных проблем Белорусского государственного университета (Беларусь, 220045, г. Минск, ул. Академика Курчатова, 7), vtchek@hep.by

Прокопенко Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники, заведующий научно-исследовательской лабораторией Донского государственного технического университета (Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), prokopenko@sssu.ru

Чумаков Владислав Евгеньевич – аспирант кафедры информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета (Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), chumakov.dssa@mail.ru

References

1. Ivanov V. V., Filanovsky I. M. *Operational amplifier speed and accuracy improvement: Analog circuit design with structural methodology*. New York, Springer, 2004. xiv, 194 p. <https://doi.org/10.1007/b105872>
2. Prokopenko N. N., Budyakov A. S. *Architecture and circuitry engineering of high speed operational amplifiers*, monograph. Shakhty, South-Rus. State Univ. of Econ. and Service Publ., 2006. 230 p. (In Russian).
3. Close J. High speed op amps: Performance, process and topologies. *2012 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM)*. Portland, OR, IEEE, 2012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/BCTM.2012.6352648>
4. Bowers D. F., Wurcer S. A. Recent developments in bipolar operational amplifiers. *Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (Cat. No. 99CH37024)*. Minneapolis, MN, IEEE, 1999, pp. 38–45. <https://doi.org/10.1109/BIPOL.1999.803521>
5. Bales J. A low-power, high-speed, current-feedback op-amp with a novel Class AB high current output stage. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1997, vol. 32, no. 9, pp. 1470–1474. <https://doi.org/10.1109/4.628768>
6. Celma S., Perez F., Martinez P. A. Compensating very high-speed current feedback op-amps. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Sensing, Processing, Networking (IMTC Proceedings)*. Ottawa, ON, IEEE, 1997, vol. 2, pp. 1293–1298. <https://doi.org/10.1109/IMTC.1997.612408>
7. Sen S., Leung B. A class-AB high-speed low-power operational amplifier in BiCMOS technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1996, vol. 31, no. 9, pp. 1325–1330. <https://doi.org/10.1109/4.535418>
8. Xie L., Guo S., Li Z., Jin X. A high speed rail-to-rail operational amplifier with constant-gm for LVDS receiver. *2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Nanning, IEEE, 2020, pp. 1044–1048. <https://doi.org/10.1109/ICCT50939.2020.9295857>
9. Dvornikov O. V., Tchekhovsky V. A., Prokopenko N. N., Galkin Ya. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. A high-speed broadband operational amplifiers on a master slice array. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 1, pp. 96–111. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111>. – EDN: QUUOLI.
10. Micropower operational amplifiers of increased speed. *Operatsionnye usiliteli i komparatory*, reference book, prep. by V. D. Averbukh et al. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2001, p. 127. Integral'nye mikroskhemy series, vol. 12. (In Russian).
11. Prokopenko N. N., Dvornikov O. V., Zhuk A. A. High-speed operational amplifier with differentiating transient correction circuits. *2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Tomsk, IEEE, 2022, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SIBCON56144.2022.10002969>

The article was submitted 13.03.2023; approved after reviewing 29.03.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Oleg V. Dvornikov – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Chief Researcher, “Minsk Scientific Research Instrument-Making Institute” JSC (Belarus, 220113, Minsk, Yakub Kolas st., 73), oleg_dvornikov@tut.by

Vladimir A. Tchekhovski – Head of the Electronic Methods and Experimental Means Laboratory, Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University (Belarus, 220045, Minsk, Akademik Kurchatov st., 7), vtchek@hep.by

Nikolay N. Prokopenko – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Information Systems and Radio Engineering Department, Head of the Research Laboratory, Don State Technical University (Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), prokopenko@sssu.ru

Vladislav E. Chumakov – PhD student of the Information Systems and Radio Engineering Department, Don State Technical University (Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), chumakov.dssa@mail.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

**Подписку на электронную версию журнала
можно оформить на сайтах:**

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»»: www.rucont.ru; www.akc.ru;
www.pressa-rf.ru
- ООО «Урал-Пресс Округ»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru

Научная статья
УДК 621.382-027.31
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-5-642-648
EDN: REPBAZ

**Исследование влияния степени вакуумирования
на добротность колебательного контура
чувствительного элемента МЭМС-датчика**

*С. П. Тимошенков¹, А. С. Тимошенков^{1,2}, С. А. Анчутин^{1,2},
Е. С. Кочурина^{1,2}, И. С. Дернов^{1,2}, А. С. Мусаткин^{1,2}, А. А. Лебедев³*

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

г. Москва, Россия

²ООО «Лаборатория Микроприборов», г. Москва, Россия

³Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

spt111@mail.ru

Аннотация. Добротность колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика зависит от многих факторов, в том числе от геометрии чувствительного элемента и степени вакуумирования. Разрабатываемые микромеханические элементы могут выполнять задачи измерения ускорения, угловой скорости, давления и т. д. Чувствительный элемент размещают в отдельном корпусе с определенной газовой средой, состояние которой оказывает влияние на характеристики прибора. В работе предложен метод определения зависимости добротности колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика от степени вакуумирования. Представлен стенд для проведения исследований. На основе полученных экспериментальных данных проведены численные расчеты добротности. Установлено, что степень вакуумирования оказывает существенное влияние на добротность колебательного контура.

Ключевые слова: МЭМС-датчик, чувствительный элемент, колебательный контур, степень вакуумирования, добротность

Для цитирования: Исследование влияния степени вакуумирования на добротность колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика / С. П. Тимошенков, А. С. Тимошенков, С. А. Анчутин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 642–648. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-642-648>. – EDN: REPBAZ.

Investigating the influence of vacuum degree on merit factor of oscillating circuit of MEMS sensor sensitive element

S. P. Timoshenkov¹, A. S. Timoshenkov^{1,2}, S. A. Anchutin^{1,2},
E. S. Kochurina^{1,2}, I. S. Dernov^{1,2}, A. S. Musatkin^{1,2}, A. A. Lebedev³

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²“Laboratory of Micro Devices” LLC., Moscow, Russia

³Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

spt111@mail.ru

Abstract. The merit factor of oscillating circuit of the MEMS sensor’s sensitive element depends on numerous factors, in particular on sensitive element geometry and vacuum degree. Micromechanical elements under development can perform tasks of measuring acceleration, angular rate, pressure, etc. Sensitive element is placed in a separate cell box with specified gas filling, the state of which influences the instrument capabilities. In this work, a method for determination of MEMS sensor sensitive element’s oscillating circuit merit factor dependence on vacuum degree is proposed. A test setup for research is described. Based on the experimental data obtained, numeric calculations of merit factor were performed. It has been established that vacuum degree exerts a significant impact on the merit factor of oscillating circuit.

Keywords: MEMS sensor, sensitive element, oscillating circuit, vacuum degree, merit factor

For citation: 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. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 642–648. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-642-648>. – EDN: REPBAZ.

Введение. Разрабатываемые микромеханические элементы могут выполнять задачи измерения ускорения, угловой скорости, давления и т. д. Чувствительный элемент (ЧЭ) МЭМС-датчика размещен в отдельном корпусе с определенной газовой средой, состояние которой, например степень вакуума, оказывает влияние на характеристики прибора. Для достижения требуемой полосы пропускания МЭМС-акселерометров, в частности МА-10 и МА-20 (ООО «ЛМП», г. Москва), в процессе производства необходимо обеспечить вакуумирование ЧЭ.

Цель настоящей работы – исследование зависимости добротности ЧЭ от степени вакуумирования.

Эксперимент. ЧЭ (рис. 1) представляет собой конструкцию маятникового типа. Инерционная масса, подвешенная к основанию с помощью упругих элементов, поворачивается под действием ускорения. Система съема сигнала о повороте ЧЭ емкостная [1, 2]. ЧЭ размещен в негерметичном металlostеклянном корпусе.

Уравнение, которое описывает движение исследуемого чувствительного элемента МЭМС-датчика, имеет следующий вид: $J\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + k\varphi = c\alpha$, где J – момент инерции ЧЭ относительно оси вращения; φ – угол отклонения ЧЭ; b – коэффициент демпфирования;

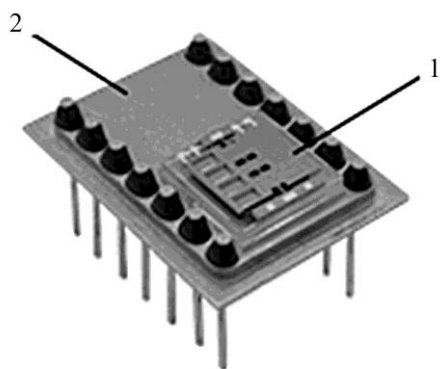


Рис. 1. Внешний вид ЧЭ 1, размещенного в металлостеклянном корпусе 2

Fig. 1. Appearance of the sensitive element 1 placed in a metal-glass case 2

k – коэффициент жесткости на кручение; c – смещение центра масс ЧЭ; m – масса чувствительного элемента; a – действующее ускорение.

Добротность колебательной системы характеризует, насколько запасы энергии системы больше возникающих ее потерь при изменении фазы на 1 рад. Данное значение обратно пропорционально скорости затухания собственных колебаний системы. Затухание амплитуды собственных колебаний ЧЭ описывается экспоненциальным законом: $y(t) = A_0 e^{-A_1 t}$, где A_0 – амплитуда колебаний ЧЭ.

Коэффициент затухания определяется добротностью:

$$A_1 = \frac{\omega_0}{2Q},$$

здесь ω_0 – собственная частота колебаний ЧЭ; Q – добротность системы, которая равна:

$$Q = \frac{2A_1}{\omega_0}.$$

Для экспериментального определения добротности Q необходимо оценить значения ω_0 и A_1 . Исследования добротности ЧЭ МЭМС-акселерометра от степени вакуумирования проводили на стенде (рис. 2), в состав которого входит вакуумная камера с находящейся в ней платой с ЧЭ МЭМС-акселерометра (рис. 3).

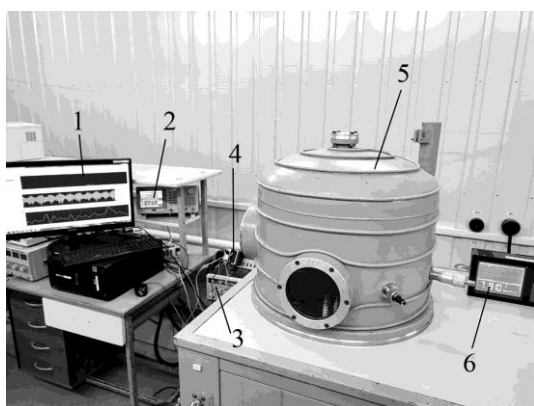


Рис. 2. Стенд для проведения исследований: 1 – ПК; 2 – генератор; 3 – источник питания; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – вакуумная камера; 6 – вакуумметр

Fig. 2. Stand designed for research: 1 – PC; 2 – generator; 3 – power supply; 4 – analog-to-digital converter; 5 – vacuum chamber; 6 – vacuum gauge

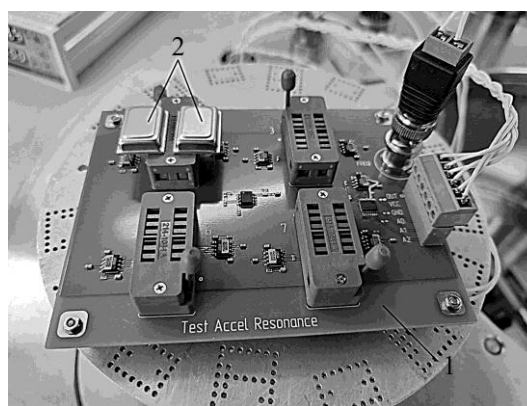


Рис. 3. Плата 1 с исследуемыми образцами ЧЭ 2, расположенная в вакуумной камере
Fig. 3. Board 1 with the samples under study of the sensitive element 2, which is located in the vacuum chamber

В вакуумной камере создается разрежение, давление в камере измеряется с помощью вакуумметра. На резонансной частоте ЧЭ возбуждаются колебания ЧЭ (электростатической силой) с помощью генератора сигнала синусоидальной формы амплитудой 5 В. В начале эксперимента генератор выключали и записывали затухающие колебания ЧЭ с помощью АЦП. Амплитуда затухания записанного сигнала аппроксимируется с использованием нелинейного метода наименьших квадратов (вычисления проводили в программном пакете MATLAB):

```
ii = (find((y-mean(y))>0));
yf = smooth(y(ii),100);
yf = yf(100:end);
tf = tg(ii);
tf = tf(100:end);
fo = fitoptions('Method', 'NonlinearLeastSquares', ...
    'StartPoint', [100, 0.01, mean(y)]);
ft = fittype('a0*exp(-a1*x)+a2', ...
    'options', fo);
[data_fit, gof2] = fit(tf,yf,ft);
Y = fft(y);
L = length(Y);
ff = [0:L/2-1]/L*Fs;
ampl = abs(Y/L);
[v,i] = max(ampl(100:L/2));
Q = pi*ff(i)/data_fit.a1;
```

Собственную частоту колебаний оценивали с помощью разложения записи в ряд Фурье.

Результаты исследования. На рис. 4 показан спектр выходного сигнала ЧЭ, собственная частота составляет 1570 Гц. На рис. 5 приведены записи затухающих колебаний ЧЭ и амплитуды колебаний при разных давлениях в камере.

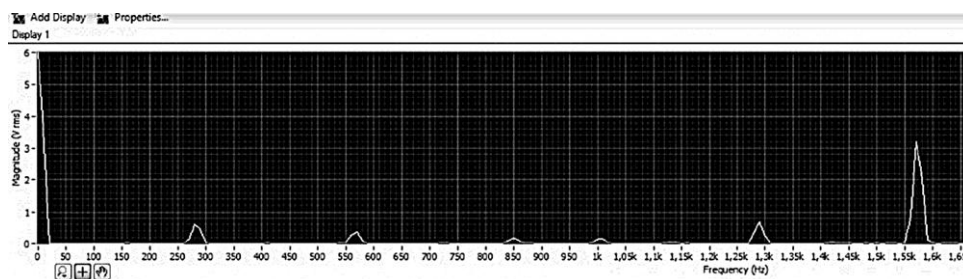


Рис. 4. Спектр выходного сигнала ЧЭ

Fig. 4. The spectrum of the output signal sensitive element

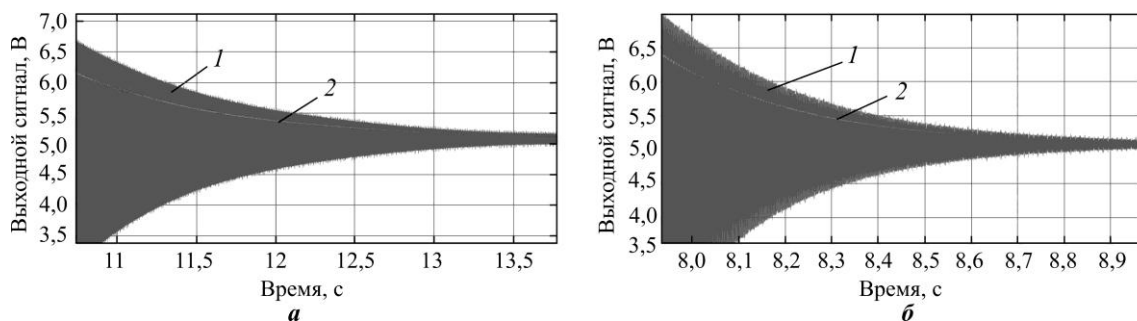


Рис. 5. Затухающие колебания ЧЭ (1) и амплитуда колебаний (2) при давлении $1,4 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. (а) и $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. (б)

Fig. 5. Recording of damped sensitive element oscillations (1) and oscillation amplitude (2) at a pressure of $1,4 \cdot 10^{-2}$ mm Hg (a) and $1 \cdot 10^{-6}$ mm Hg (b)

Приведем результаты оценки добротности ЧЭ, полученной на основе экспериментальных данных, в зависимости от давления в камере:

Давление в камере, мм рт. ст	Добротность
$1,4 \cdot 10^{-2}$	2206,19
$9 \cdot 10^{-3}$	3178,21
$7,5 \cdot 10^{-3}$	3866,85
$1 \cdot 10^{-3}$	5279,52
$1 \cdot 10^{-4}$	6763,99
$1 \cdot 10^{-5}$	7169,00
$5 \cdot 10^{-6}$	7167,49
$3 \cdot 10^{-6}$	7546,17
$2 \cdot 10^{-6}$	7477,90
$1 \cdot 10^{-6}$	8699,30

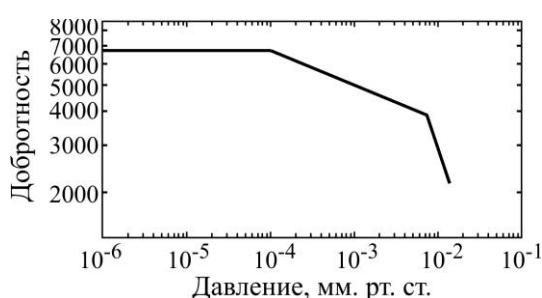


Рис. 6. Зависимость добротности колебательного контура от давления в камере

Fig. 6. Dependence of the quality factor of the oscillatory circuit on the pressure in the chamber

На основе полученных данных построен график зависимости добротности колебательного контура от давления в камере – степени вакуумирования (рис. 6). Характер графика соответствует результатам, показанным в работах [3, 4].

Закключение. Результаты проведенного экспериментального исследования зависимости добротности колебательного контура ЧЭ от степени вакуумирования не противоречат известным результатам [3, 4] и подтверждают, что степень вакуумирования оказывает существенное влияние на добротность колебательного контура.

Разработанный ЧЭ способен измерять давление в диапазоне 10^{-4} – 10^{-2} мм рт. ст. Установлена зависимость добротности колебательного контура от степени вакуумирования для исследуемой разработанной конструкции ЧЭ. В диапазоне давлений 10^{-4} – 10^{-2} мм рт. ст. зависимость добротности колебательного контура от давления близка к линейной. В этом диапазоне разработанный ЧЭ можно использовать и для измерения степени вакуумирования. При значении давления в камере ниже 10^{-4} мм рт. ст. добротность практически перестает зависеть от давления. Это свидетельствует о том, что при высокой степени вакуумирования газовое демпфирование не оказывает существенного влияния на параметры колебательного контура и добротность ЧЭ определяется другими факторами, в частности трением в материале, диссипацией энергии в подвесе и т. п.

Материалы статьи доложены на Российском форуме «Микроэлектроника 2022» (2–8 октября 2022 г., г. Сочи).

Литература

1. Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра / Е. С. Кочурина, С. А. Анчутин, В. В. Калугин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 59–67. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67>. – EDN: JPSKAX.
2. Разработка и исследование МЭМС-акселерометра / Е. С. Кочурина, С. А. Анчутин, А. С. Мусаткин и др. // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № S8-1 (113). С. 235–238. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.235.238>. – EDN: NAVGJZ.

3. *Gavan K. B., Heijden J. van der, Drift E. W. J. M. van der, Zant H. S. J. van der.* Effect of pressure on the Q factor and the resonance frequency of SiN microcantilevers // 2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Shenzhen: IEEE, 2009. P. 380–384. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2009.5068600>

4. *Blom F. R., Bouwstra S., Elwenspoek M., Fluitman J. H. J.* Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry // J. Vac. Sci. Technol. B. 1992. Vol. 10. Iss. 1. P. 19–26. <https://doi.org/10.1116/1.586300>

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.07.2023 г.;
принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), spt111@mail.ru

Тимошенко Алексей Сергеевич – доктор технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), генеральный директор ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), at@mp-lab.ru

Анчутин Степан Александрович – ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ведущий инженер ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), step@mail.ru

Кочурина Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), главный метролог ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), ekochurina@mp-lab.ru

Дернов Илья Сергеевич – инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), i.s.dernov@yandex.ru

Мусаткин Александр Сергеевич – инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), musatkin.a@hotmail.com

Лебедев Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент Института общинженерной подготовки Московского авиационного института (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4), alebandr@gmail.com

References

1. Kochurina E. S., Anchutin S. A., Kalugin V. V., Zaryankin N. M., Timoshenkov A. S., Dernov I. S. Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 59–67. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67>. – EDN: JPSKAX.

2. Kochurina E. S., Anchutin S. A., Musatkin A. S., Dernov I. S., Timoshenkov A. S., Polushkin V. M., Timoshenkov S. P. Research and development of a MEMS-accelerometer. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2022, vol. 15, no. S8-1 (113), pp. 235–238. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.235.238>. – EDN: NAVGJZ.
3. Gavan K. B., Heijden J. van der, Drift E. W. J. M. van der, Zant H. S. J. van der. Effect of pressure on the Q factor and the resonance frequency of SiN microcantilevers. *2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Shenzhen, IEEE, 2009, pp. 380–384. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2009.5068600>
4. Blom F. R., Bouwstra S., Elwenspoek M., Fluitman J. H. J. Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1992, vol. 10, iss. 1, pp. 19–26. <https://doi.org/10.1116/1.586300>

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 05.07.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt111@mail.ru

Aleksey S. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), General Manager of the “Laboratory of Micro Devices” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), at@mp-lab.ru

Stepan A. Anchutin – Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Engineering, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the “Laboratory of Micro Devices” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), step@mail.ru

Elena S. Kochurina – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Chief Metrologist of the “Laboratory of Micro Devices” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), ekochurina@mp-lab.ru

Ilya S. Dernov – Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of “Laboratory of Micro Devices” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), i.s.dernov@yandex.ru

Alexandr S. Musatkin – Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the “Laboratory of Micro Devices” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), musatkin.a@hotmail.com

Andrey A. Lebedev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of General Engineering Training, Moscow Aviation Institute (Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe highway, 4), alebandr@gmail.com

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Научная статья

УДК 621.373.8:681.5.03

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-5-649-658

EDN: MJZGFB

Миниатюрный стандарт частоты на основе КПН в Cs

А. Ф. Курчанов, С. Н. Слюсарев, С. Н. Овчинников, А. С. Сальников

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, р/н Менделеево, Россия*

kurchanov@vniiftri.ru

Аннотация. При исследовании резонанса когерентного пленения населенности (КПН) предполагается, что длина волны лазера установлена на пик поглощения ячейки. Однако в этом случае максимальная амплитуда квантового частотного дискриминатора не достигается и даже небольшое отклонение длины волны лазера от традиционного положения на пике поглощения может увеличить полезное действие КПН в 5 раз. Зависимости частоты КПН-резонанса, амплитуды и крутизны квантового дискриминатора на основе КПН от длины волны лазера являются существенными, но малоизученными. В связи с этим их экспериментальное изучение – перспективное направление. В работе изучены возможные режимы работы ячеек цезия Cs при создании миниатюрного стандарта частоты с объемом корпуса менее 50 см³. Исследуемые ячейки Cs имеют разный состав газа и разное давление и изготовлены с использованием разных технологий. Установлено, что все исследованные ячейки характеризуются минимальной резонансной частотой КПН на длине волны лазера, немного большей, чем на пике поглощения. Описана конструкция экспериментального образца квантового стандарта частоты с силовой объемной компоновкой электронных плат в виде «домика», внутри которого размещен экранированный термостат с квантовой газовой ячейкой. Показано, что малый размер электронных плат с паяным соединением по их периметрам гарантирует отсутствие низкочастотных мод изгибных колебаний и обеспечивает высокую механическую прочность при возможных ускорениях квантового стандарта частоты.

Ключевые слова: когерентное пленение населенности, КПН, ячейка Cs, длина волны, экстремум частоты, стабильность частоты, компоновка электроники

Благодарности: авторы выражают благодарность Д. А. Парехину за ценные рекомендации при обсуждении методик исследования, а также А. Н. Нукраеву за помощь в изготовлении составных частей макетов стандарта.

Для цитирования: Курчанов А. Ф., Слюсарев С. Н., Овчинников С. Н., Сальников А. С. Миниатюрный стандарт частоты на основе КПП в Cs // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 649–658. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-649-658>. – EDN: MJZGFB.

Original article

Miniature frequency standard based on CPT in Cs

A. F. Kurchanov, S. N. Slyusarev, S. N. Ovchinnikov, A. S. Salnikov

*All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical
and Radio Measurements, Mendeleevo work settlement, Russia*

kurchanov@vniiftri.ru

Abstract. The coherent population trapping (CPT) resonance studies suppose that laser wavelength is set at absorption peak of a cell. However, in this case the maximum amplitude of quantum frequency discriminator is not reached and even slight deviation in laser wavelength can quintuple the CPT efficiency. Dependences of CPT resonance frequency, amplitude and slope of CPT-based quantum discriminator on laser wavelength are significant but understudied. Thus their experimental study is promising. In this work, possible operating modes of Cs cells are studied upon development of miniature frequency standard with body volume less than 50 cm³. The Cs cells under study have different gas composition and pressure and are made using various fabrication techniques. It has been established that all studied cells have minimal CPT resonance frequency at laser wavelength that is slightly longer than at absorption peak. A construction design of development prototype of quantum frequency standard with power spatial layout of electronic boards in the form of a “box” inside which a shielded thermostat with a gas quantum cell is placed, is described. It was shown that small size of electronic boards with soldered joints on perimeter guarantees against low-frequency flexural vibration modes and ensures high mechanical performance at possible accelerations of quantum frequency standard.

Keywords: coherent population trapping, CPT, Cs cell, wavelength, frequency extremum, frequency stability, electronics layout

Acknowledgments: the authors thank D. A. Parekhin for insightful recommendations at the research methods discussions, and A. N. Nukraev for help in preparing the component parts of the standard layout draws.

For citation: Kurchanov A. F., Slyusarev S. N., Ovchinnikov S. N., Salnikov A. S. Miniature frequency standard based on CPT in Cs. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 649–658. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-649-658>. – EDN: MJZGFB.

Введение. Стандарты частоты, основанные на когерентном пленении населенности (КПП) [1] и использующие газовые ячейки с Cs или Rb⁸⁷, изготовлены и тщательно исследованы очень давно. В то же время ежегодное количество публикаций на эту тему не уменьшается, что указывает на возможность проведения дополнительных исследований резонанса КПП.

При исследовании КПН-резонанса предполагается, что длина волны лазера установлена на пик поглощения ячейки. Однако в этом случае максимальная амплитуда квантового частотного дискриминатора (полезное действие резонанса КПН) не достигается и даже небольшое отклонение длины волны лазера от традиционного положения на пике поглощения может усилить полезное действие КПН в 5 раз (для природного Rb в ячейке) [2]. Зависимости частоты резонанса КПН, амплитуды и крутизны квантового дискриминатора на основе КПН от длины волны лазера существенны и малоизучены, поэтому исследования в этом направлении представляют интерес.

В работе [3] изучено частотное поведение квантового стандарта на основе КПН в ячейке с Cs при значительном отклонении длины волны лазера от вершины пика поглощения. Оказалось, что возле пика поглощения зависимость частоты КПН резонанса ячейки от длины волны лазера может показать увеличение или уменьшение частоты в зависимости от состава буферного газа и его давления. В этом случае для длин волн вблизи пика поглощения в ячейке с Cs наблюдаются экстремумы (максимум и минимум) резонансной частоты КПН, когда длина волны лазера отклоняется от пика поглощения. Испытания экспериментального образца (ЭО) стандарта в режиме стабилизации длины волны лазера по экстремуму частоты КПН резонанса ячейки (а не по пику его поглощения) показали возможность повышения стабильности стандарта частоты на суточном интервале времени.

В настоящей работе изучаются возможные режимы работы ячеек Cs [3] при создании миниатюрного стандарта частоты на основе КПН с объемом корпуса менее 50 см³. Проводится экспериментальная проверка реализации разработанной компактной конструкции стандарта частоты и нового режима его автоматического регулирования без привязки длины волны лазера к пику поглощения в ячейке. Исследуемые ячейки Cs имеют разный состав газа и разное давление и изготовлены с использованием разных технологий. Однако все ячейки показали наличие минимальной резонансной частоты КПН на длине волны лазера, немного большей, чем на пике поглощения.

Особенности конструкции стандарта и ее сборки. Для того чтобы ЭО квантового стандарта частоты (КСЧ) разместить в требуемом объеме корпуса при сохранении достаточной суммарной площади электронных плат, они расположены на внешней поверхности параллелепипеда. В этом случае его внутренний объем возможно использовать для размещения квантовой газовой ячейки в термостате, одновременно выполняющем роль внутреннего магнитного экрана. При этом роль внешнего магнитного экрана выполняет корпус ЭО КСЧ. В конструкции стандарта используется прямоугольный магнитный экран ячейки, который одновременно является термостатом с прямоугольными катушками подмагничивания и асимметричной схемой нагрева.

Конструкция стандарта (рис. 1) предполагает размещение ячейки в прямоугольном термостате (рис. 2), подвешенном на нитях, при этом лазерный луч проходит через окна перпендикулярно длинной стороне, а отросток ячейки параллелен длинной стороне. Электроника стандарта расположена на основных и вспомогательных платах, контакты которых сдвинуты к краям плат, что позволяет одновременно с передачей электрических сигналов осуществлять силовую сборку прямоугольного параллелепипеда, внутри которого расположен подвесной прямоугольный термостат. Эта конструкция припаяна снизу к основанию с рядами герметичных выводов (рис. 3) и выводом, являющимся ключом и контактом корпуса.

Крышка корпуса ЭО КСЧ (см. рис. 1) соединена с основанием, воздух откачен до вакуума, корпус заполнен газом Хе с низким коэффициентом теплопроводности. Отросток медного капилляра для заполнения корпуса газом на рис. 1 не показан (он впаян

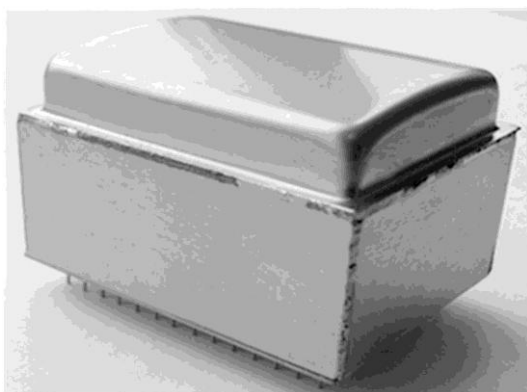


Рис. 1. Корпус с электрическими выводами
Fig. 1. Enclosure with electrical outlets

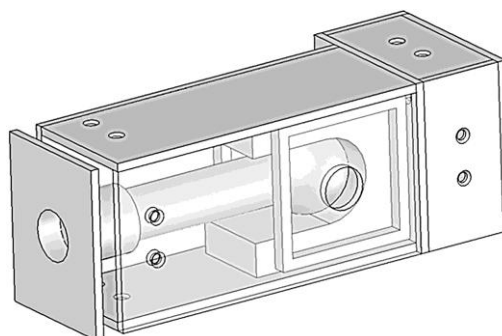


Рис. 2. Ячейка в прямоугольном термостате
Fig. 2. Cell in a rectangular thermostat

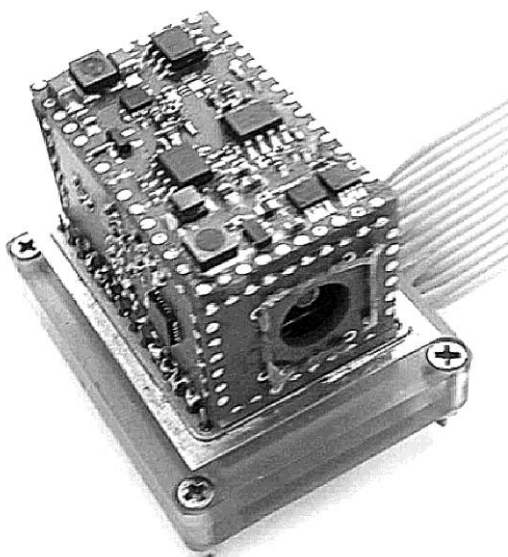


Рис. 3. Частичная сборка (без крышки корпуса)
Fig. 3. Partial assembly (without housing cover)

через вспомогательную втулку на плоской части корпуса). Правильная очередность сборки и использование оснастки позволяют одновременно обеспечить точное положение оси ячейки и отверстий термостата относительно луча лазера и натянуть все кевларовые нити с примерно равными усилиями. Экспериментально изучена возможность использования вместо нитей проволок, приваренных к термостату лазерной сваркой и впаянных в металлизированные отверстия стенок. Оба эти варианта показали возможность их эффективного использования.

Цепи плат выведены на контакты по периметру и припаяны к контактам сопрягаемых плат. При этом часть контактов выполнена в виде металлизированных отверстий, а часть – в виде полукруглых контактов. Прямоугольные катушки подмагничивания приклеены к внутренним поверхностям стенок термостата и создают магнитное поле в направлении распространения лазерного луча через ячейку (см. рис. 2). Эта конструкция отличается от конструкций, в которых электронные платы и «физическая часть» сгруппированы в два отдельных блока и занимают объем примерно 60 см^3 [4].

Варианты режимов работы КСЧ. После сборки стандарта (см. рис. 1–3) опробована его работа в традиционном для работ по КПН режиме [1]. Практически во всех работах по КПН-резонансу описывается режим работы, при котором вначале длину волны лазера привязывают к наблюдаемому в ячейке пику поглощения, а далее изучают КПН-эффект. При этом длина волны лазера преобразована модуляцией тока лазера частотой f , примерно равной половине частоты $2F$ микроволнового перехода. Спектр излучения лазера содержит, таким образом, ряд спектральных линий. При этом линии, отличающиеся от исходной частоты лазера на $\pm f$, попадают на два соседних пика поглощения в парах щелочного металла ячейки. Наблюдаемый пик поглощения образован двумя соседними пиками поглощения для двух разных линий в спектре лазера. К вершине этого пика поглощения привязывают регулировку длины волны лазера.

При изменении частоты f от несколько меньшей F до несколько большей F вблизи их точного равенства наблюдается КПН-резонанс ячейки, выражающийся в снижении поглощения примерно на 1 %. Ширина такого резонанса может зависеть от способа его детектирования. Чаще всего используют частотную модуляцию частоты f с частотой f_0 , равной, например, 10 кГц, что намного превышает ширину КПН-резонанса. Однако это позволяет использовать лазер в режиме малых собственных шумов. Синхронное детектирование частоты f_0 в принятом фотоприемником свете, прошедшем через ячейку, позволяет вырабатывать дискриминатор частоты и проводить регулирование среднего значения частоты f так, чтобы привязать ее к наблюдаемому в ячейке КПН-резонансу.

Результаты и их обсуждение. После опробования работы собранного КСЧ в описанном традиционном режиме [1] изучены и другие режимы его работы. В одном из них после захвата стандартом КПН-резонанса ячейки длина волны установлена несколько меньше, чем на пике поглощения, и затем проведено ее медленное линейное увеличение до значения, несколько большего, чем на пике поглощения. На рис. 4 показана зависимость резонансной частоты КПН от длины волны лазера для ячеек Cs + Ne (72 %) + Ar (28 %) при температуре 60 °С с давлением 80, 100 и 120 торр, полученная в работе [3].

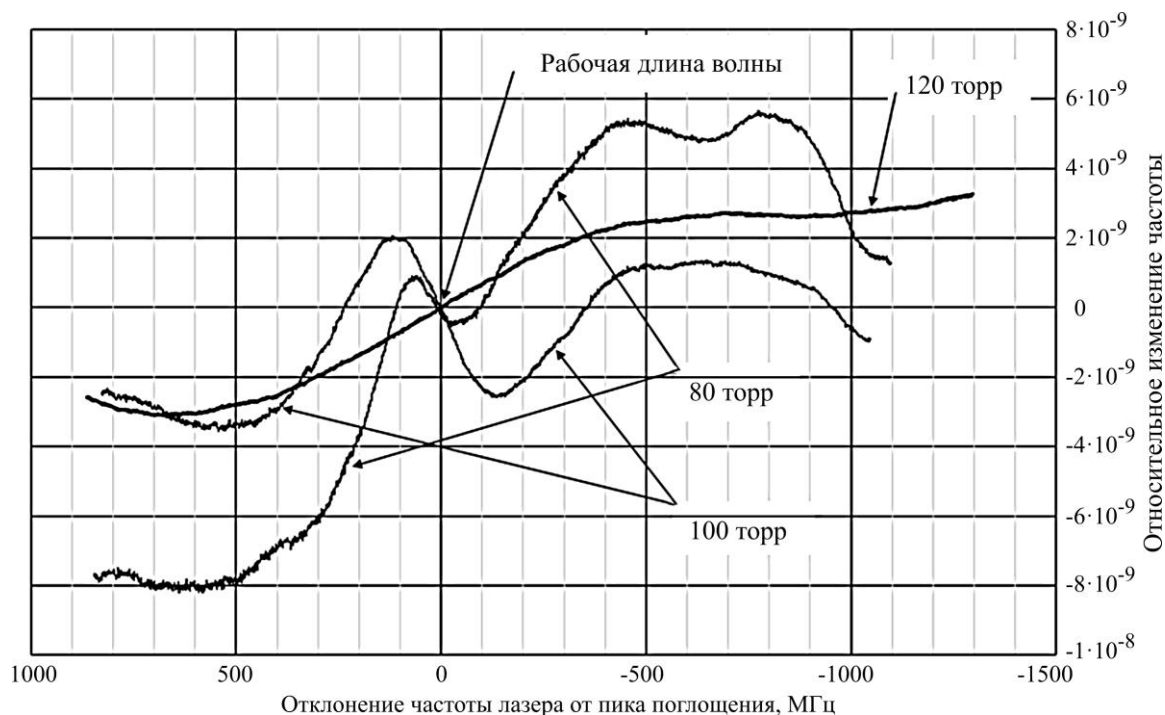


Рис. 4. Зависимость частоты модели от длины волны (частоты) лазера (вблизи рабочей длины волны график частоты падает при давлении 80 и 100 торр и растет при давлении 120 торр) [3]

Fig. 4. Dependence of the frequency of standard on the wavelength (frequency) of the laser (near the operating wavelength, the frequency plot drops at a pressure of 80 and 100 Torr and rises at a pressure of 120 Torr) [3]

Ячейки с давлением 80 и 100 торр показывают экстремумы (максимум и минимум) частоты стандарта при отклонении частоты лазера от пика поглощения на +70 и -40 МГц для 80 торр, +120 и -130 МГц для 100 торр. Привязка длины волны (частоты) лазера к минимуму частоты КСЧ показала стабильность в его работе в отличие от привязки длины волны к максимуму частоты КСЧ.

Следующая партия ячеек изготовлена с меньшей долей Ar (13 %) в смеси буферных газов для того, чтобы добиться экстремума (максимума) частоты КСЧ для ячейки при температурах 50–60 °С. Для этих ячеек (рис. 5) также наблюдается минимум частоты КСЧ при длине волны несколько большей, чем на пике поглощения. Для работы КСЧ выбрана пара длин волн вблизи этого минимума, отличающихся между собой по частоте примерно на 30 МГц, смена длины волны в этой паре происходила с частотой в несколько сотен герц. В результате такой более сложной модуляции оказалось возмож-

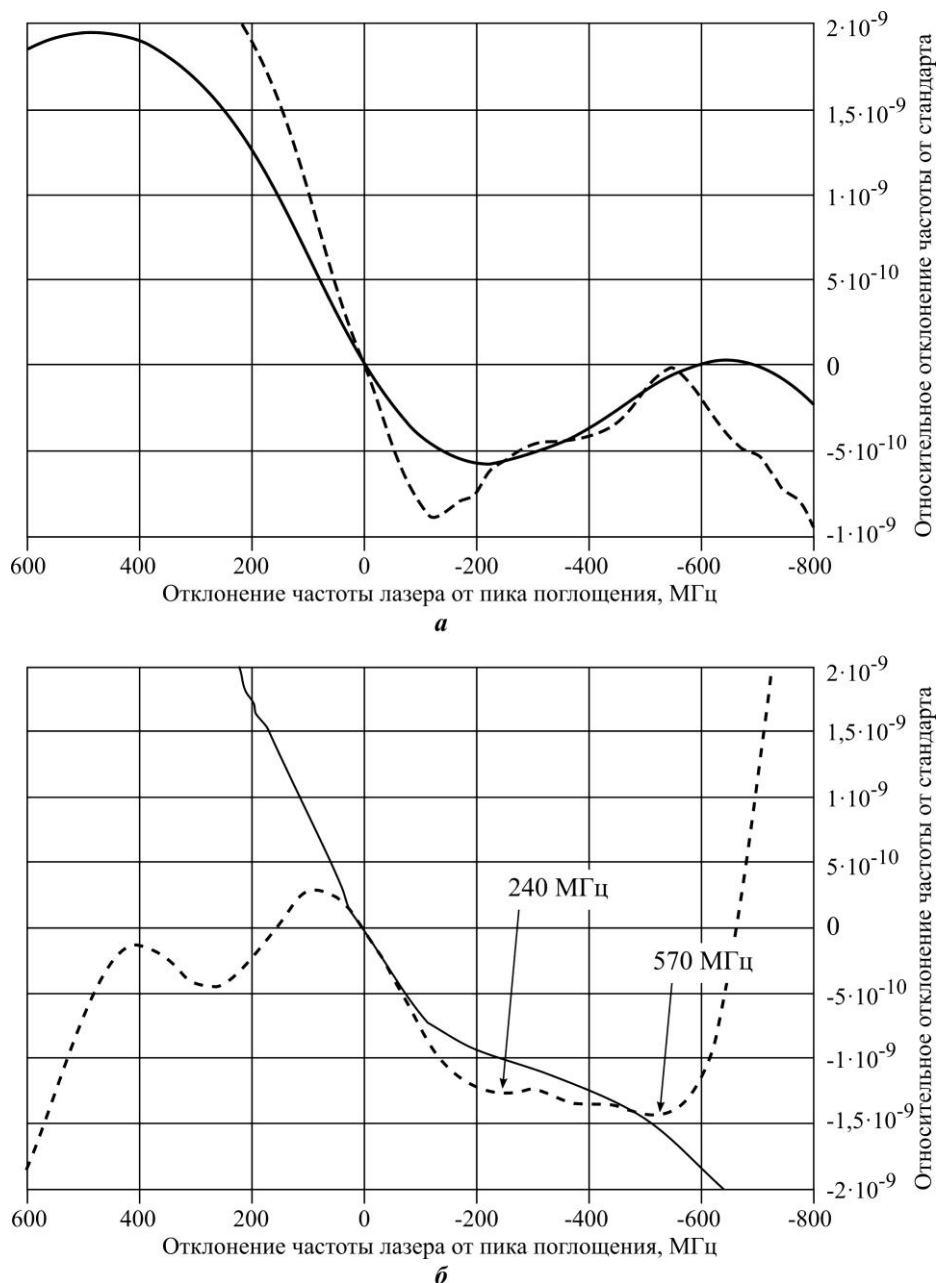


Рис. 5. Дискриминатор длины волны лазера на основе поглощения в ячейке (сплошная линия) и относительное отклонение частоты КПН резонанса ячейки и частоты стандарта (пунктирная линия) для разных ячеек: а – при давлении 100 торр; б – при давлении 130 торр

Fig. 5. Laser wavelength discriminator based on absorption in the cell (solid line) and the relative deviation of the CPT frequency of the cell resonance and the frequency of the standard (dotted line) for different cells: a – at a pressure of 100 Torr; b – at a pressure of 130 Torr

ным удерживать длину волны лазера именно по минимуму выходной частоты стандарта без привязки ее к пику поглощения. Разность выходов квантовых дискриминаторов частоты для этой пары волн управляет регулированием средней длины волны лазера и в рабочей точке обращается в ноль. Полусумма выходов квантовых дискриминаторов частоты для этой пары волн управляет регулированием частоты СВЧ-генератора, а следовательно, и частоты КСЧ. Точность стандарта, достигнутая в рассмотренных условиях, оценена экспериментально с использованием водородного генератора с выходной частотой 10 МГц в качестве опорного сигнала и анализатора фазовых шумов 53100А фирмы «Микрочип» (г. Москва) для сравнения с частотой 10 МГц исследуемого экспериментального образца.

Девиации Аллана в КСЧ для ячейки при давлении 100 торр смеси газов Ne (87 %) и Ar (13 %) со стабилизацией длины волны лазерного излучения на минимуме резонансной частоты КПН [3] показана на рис. 6, она составляет $7,5 \cdot 10^{-11}$ (1 с), $9,9 \cdot 10^{-12}$ (100 с), $3,7 \cdot 10^{-12}$ (10^5 с). При этом ЭО находился в шкафу при стабильных климатических условиях. Та же компоновка в традиционном режиме установки длины волны лазера на пик поглощения уже для интервалов 15 000 с показала стабильность хуже, чем $1 \cdot 10^{-11}$, и ее дальнейшее ухудшение на суточном интервале.

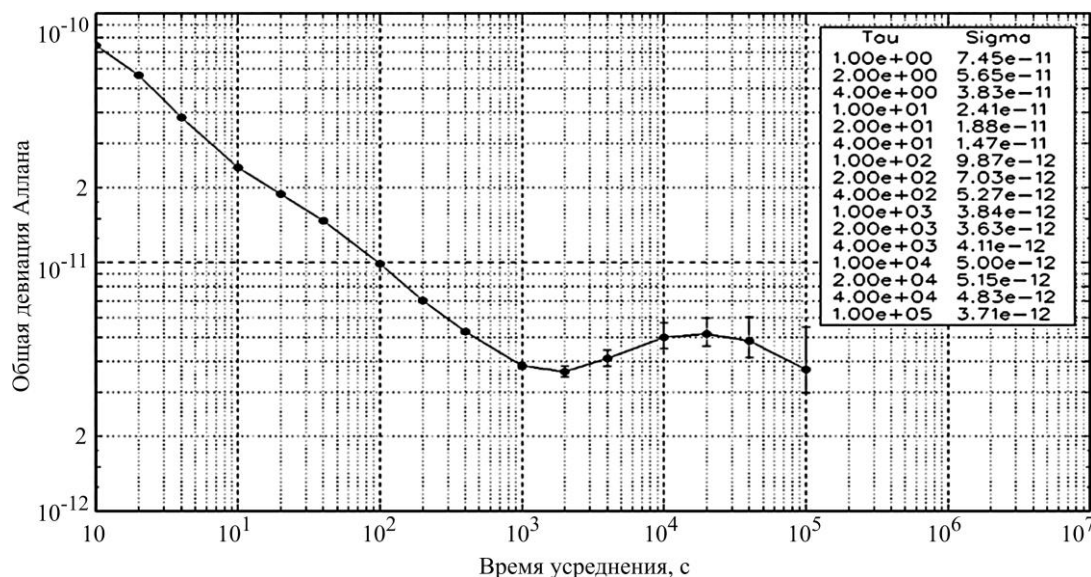


Рис. 6. Отклонение Аллана ячейки при давлении 100 торр со стабилизацией длины волны лазера по минимуму резонансной частоты КПН

Fig. 6. Allan deviation of the cell at a pressure of 100 Torr with laser wavelength stabilization at the minimum of the CPT resonant frequency

Изучены ячейки, имеющие экстремум (максимум) частоты КПН-резонанса в зависимости от температуры около 62 °С. Ячейка КСЧ (рис. 5, а) наполнена смесью газов Ne (87 %) и Ar (13 %) при давлении 100 торр, сдвиг микроволнового перехода в Cs при этом равен 51 646 Гц, минимальная резонансная частота КПН достигнута при смещении частоты лазера примерно на –120 МГц. Поведение другой ячейки Cs показано на рис. 5, б. Ячейка Cs заполнена газом Ne (87 %) и Ar (13 %) при давлении 130 торр, сдвиг микроволнового перехода в Cs составляет 77 118 Гц, минимальная резонансная частота КПН достигнута при смещении частоты лазера примерно на –570 МГц.

Таким образом, выявлен минимум резонансной частоты КПН в ячейках с разным составом буферного газа и различными давлениями. На этом минимуме частоты КПН частота лазера сдвинута на 40–600 МГц в сторону уменьшения частоты лазера (увеличения его длины волны) относительно наблюдаемого пика поглощения ячейки. Наличие такого экстремума ранее не было описано в литературе и не обсуждалось в отношении ячеек с Cs.

Исследована возможность использования нового лазерного дискриминатора длин волн. Он основан на минимальной резонансной частоте КПН в зависимости от длины волны лазера. Детектор длины волны лазера использует детектор резонансной частоты КПН, но в специальном режиме. Для этого длина волны лазера резко меняется между двумя значениями, например на расстоянии 30 МГц друг от друга, с частотой несколько сотен герц. Половина суммы выходных сигналов частотного дискриминатора на этих двух длинах волн используется для регулировки выходной частоты стандарта. Разница в выходах дискриминаторов для этих двух длин волн позволяет обнаружить отклонение длины волны лазера от точки минимума резонансной частоты ячейки КПН с парами Cs и выполнить настройку (см. рис. 6).

Однако описанный и опробованный экспериментально вариант компоновки электроники нерационально использует площади поверхностей боковых малых плат, выполняющих функцию коммутации сигналов. В настоящее время прорабатывается вариант компоновки с размещением на малых платах лазера и фотоприемника при изменении направления распространения луча с поперечного направления на продольное. В этом случае высвобождается часть площади на платах, что позволяет использовать более сложную и более точную электронную схему стандарта.

Заключение. Выявленный экстремум (минимум) резонансной частоты КПН в зависимости от длины волны лазера в ячейках Cs для различных составов и давлений буферного газа показал возможность полезного применения такого экстремума для повышения долгосрочной стабильности КСЧ. Компактная компоновка электроники ЭО КСЧ в объеме менее 50 см³ обеспечивает прочность конструкции и ее стойкость к вибрациям при одновременном отсутствии низкочастотных резонансов.

Традиционный подход к построению радиоэлектронной аппаратуры подразумевает, что в кабинах расположены шкафы, в шкафах – модули, состоящие из электронных плат, собранных «этажеркой», а тепловой режим обеспечивается системой воздушного или жидкостного охлаждения. Однако более чем 10 лет назад в МИЭТ начали развиваться другие принципы построения аппаратуры, использующие гибридные объемные конструкции, в том числе на упругих эластичных платах, а также в виде трех треугольных плат, соединенных ребрами в пирамиду. Конструкция, в которой соединенные в параллелепипед платы выполняют роль силового элемента для подвески на нитях термостата ячейки, характеризуется новизной, что подтверждено патентом [6].

Экспериментальное изучение возможностей нестандартной стабилизации длины волны лазера (не по пику поглощения), а также их реализация при проектировании миниатюрного стандарта возможно не только для описанного варианта стабилизации длины волны, но и для семейств сходных с ним алгоритмов. Причины зависимости частоты КПН резонанса (и выходной частоты стандарта) от длины волны лазера трудно объяснить, в частности зависимость на рис. 4 для ячейки с давлением буферного газа 120 торр, имеющую обратный наклон в точке пика поглощения ячейки (зависимость для этой ячейки воспроизводилась многократно).

Материалы статьи доложены на Российском форуме «Микроэлектроника 2022» (15–16 сентября 2022 г., г. Москва, г. Зеленоград).

Литература

1. Knappe S. 3. 18 – MEMS atomic clocks // *Comprehensive microsystems: reference work* / eds-in-chief Y. B. Gianchandani, O. Tabata, H. Zappe. Amsterdam: Elsevier Science, 2008. Vol. 3. P. 571–612. <https://doi.org/10.1016/B978-044452190-3.00048-3>
2. Блинов И. Ю., Курчанов А. Ф., Пьявкина В. В., Сальников А. С. О наблюдении КПП-эффекта в природном рубидии // *Альманах современной метрологии*. 2020. № 3 (23). С. 115–127. EDN: TOIPEP.
3. Курчанов А. Ф., Сальников А. С. Зависимость частоты КПП-резонанса ячейки с парами цезия от длины волны лазера // *Альманах современной метрологии*. 2021. № 3 (27). С. 26–40. EDN: QLAADB.
4. Пат. 197054 РФ. Сверхминиатюрный квантовый стандарт частоты / С. Н. Атутов, С. Н. Багаев, М. Ю. Басалаев и др.; заявл. 12.12.2019; опубл. 26.03.2020, Бюл. № 9. 7 с. EDN: TVDUZL.
5. Пат. 2773966 РФ. Способ выбора рабочего режима квантового стандарта частоты / А. Ф. Курчанов, А. С. Сальников, С. Н. Овчинников; заявл. 21.10.2021; опубл. 14.06.2022, Бюл. № 17. 13 с. EDN: WQCQSG.
6. Пат. 2776279 РФ. Сверхминиатюрный квантовый стандарт частоты и способ компоновки его составных частей / А. Ф. Курчанов, А. С. Сальников, С. Н. Овчинников; заявл. 13.10.2021; опубл. 15.07.2022, Бюл. № 20. 18 с.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 06.06.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Курчанов Анатолий Федорович – старший научный сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия, 141570, Московская обл., г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ВНИИФТРИ, корп. 11), kurchanov@vniiftri.ru

Слюсарев Сергей Николаевич – начальник центра Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия, 141570, Московская обл., г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ВНИИФТРИ, корп. 11), slyusarev@vniiftri.ru

Овчинников Сергей Николаевич – начальник отдела Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия, 141570, Московская обл., г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ВНИИФТРИ, корп. 11), ovchinnikov_s@vniiftri.ru

Сальников Алексей Сергеевич – инженер-технолог Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия, 141570, Московская обл., г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ВНИИФТРИ, корп. 11), salnikov@vniiftri.ru

References

1. Knappe S. 3. 18 – MEMS atomic clocks. *Comprehensive microsystems*, reference work, eds-in-chief Y. B. Gianchandani, O. Tabata, H. Zappe. Amsterdam, Elsevier Science, 2008, vol. 3, pp. 571–612. <https://doi.org/10.1016/B978-044452190-3.00048-3>
2. Blinov I. Yu., Kurchanov A. F., Pyavkina V. V., Salnikov A. S. On observation of CPT-effect in natural rubidium. *Al'manakh sovremennoy metrologii = Al'manac of Modern Metrology*, 2020, no. 3 (23), pp. 115–127. (In Russian). EDN: TOIPEP.
3. Kurchanov A. F., Salnikov A. S. Dependence of the CPT resonance frequency of a cell with cesium vapors on the laser wave length. *Al'manakh sovremennoy metrologii = Al'manac of Modern Metrology*, 2021, no. 3 (27), pp. 26–40. (In Russian). EDN: QLAADB.
4. Atutov S. N., Bagaev S. N., Basalaev M. Yu., Blinov I. Yu., Brazhnikov D. V., Vasil'ev V. A., Vishnyakov V. I., Gaysler V. A. et al. *Subminiature quantum frequency standard*. Patent 197054 RF, publ. 26.03.2020, Bul. no. 9. 7 p. (In Russian). EDN: TVDUZL.

5. Kurchanov A. F., Salnikov A. S., Ovchinnikov S. N. *Method for selecting the operating mode of the quantum frequency standard*. Patent 2773966 RF, publ. 14.06.2022, Bul. no. 17. 13 p. (In Russian). EDN: WQCQSG.

6. Kurchanov A. F., Salnikov A. S., Ovchinnikov S. N. *Subminiature quantum frequency standard and the method for arranging its components*. Patent 2776279 RF, publ. 15.07.2022, Bul. no. 20. 18 p. (In Russian).

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 06.06.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Anatoly F. Kurchanov – Senior Scientific Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements (Russia, 141570, Moscow region, Solnechnogorsk, Mendeleevo work settlement, VNIIFTRI industrial zone, 11), kurchanov@vniiftri.ru

Sergey N. Slyusarev – Head of the Center, All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements (Russia, 141570, Moscow region, Solnechnogorsk, Mendeleevo work settlement, VNIIFTRI industrial zone, 11), slyusarev@vniiftri.ru

Sergey N. Ovchinnikov – Head of the Department, All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements (Russia, 141570, Moscow region, Solnechnogorsk, Mendeleevo work settlement, VNIIFTRI industrial zone, 11), ovchinnikov_s@vniiftri.ru

Aleksey S. Salnikov – Process Engineer, All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements (Russia, 141570, Moscow region, Solnechnogorsk, Mendeleevo work settlement, VNIIFTRI industrial zone, 11), salnikov@vniiftri.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис». Подписной индекс 38934
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: <http://presskiosk.ru/categories>
- через редакцию – с любого номера и до конца года

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.021:519.177
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-5-659-669
EDN: LTDFVW

Использование $(0, \mu)$ -свернутого произведения многомерных матриц для решения задач теории графов

А. И. Макаров, В. И. Мунерман

Смоленский государственный университет, г. Смоленск, Россия

al.makarov8@yandex.ru

Аннотация. Решения прикладных задач теории графов применяются в микроэлектронике, логистике, при проектировании систем высокой доступности и компьютерных сетей. Однако существующие решения имеют недостаточную масштабируемость, вследствие чего применяются только для узких вариаций задач: поиска кратчайшего пути из одной вершины в другую, определения существования такого пути в целом, определения связности отдельной конкретной группы вершин. В работе представлен метод решения нескольких прикладных задач теории графов, основанный на алгебре многомерных матриц. Предлагаемый метод рассмотрен в сравнении с классическими эвристическими методами. Показана возможность получения решения задач, развернутого на все вершины графа и их комбинации, в отличие от заранее выбранных в классическом варианте. Описанный метод, а именно $(0, \mu)$ -свернутое произведение матриц, может использоваться для решения задачи поиска пересечения в кликах, определения достижимости вершин в графе и числа комбинаций всех возможных клик в графе, а также для проведения проверки, является ли граф деревом.

Ключевые слова: теория графов, многомерные матрицы, клика, дерево графа

Для цитирования: Макаров А. И., Мунерман В. И. Использование $(0, \mu)$ -свернутого произведения многомерных матриц для решения задач теории графов // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 659–669. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-659-669>. – EDN: LTDFVW.

Application of $(0, \mu)$ convoluted product of multidimensional matrices for graph theory problems solving

A. I. Makarov, V. I. Munerman

Smolensk State University, Smolensk, Russia

al.makarov8@yandex.ru

Abstract. The solutions of applied graph-theory problems are used in microelectronics, logistics, and design of highly available systems and computer networks. However, existing solutions have poor scalability and thereby are only applied to narrow variations of problems: shortest path search from one vertex to another, determining of such path availability in general, determining of connectivity of specific separated group of vertices. In this work, a problem-solving procedure for several applied problems of graph theory based on the algebra of multidimensional matrices is presented. The procedure is considered in comparison with classical heuristic methods. The availability of problem solution related to all vertices of the graph and their combinations, unlike those previously selected in the classical methods, has been demonstrated. The proposed procedure, namely the $(0, \mu)$ convoluted product of matrices, can be applied for solving problem of finding intersections in cliques, determining the reachability of vertices in the graph and the number of combinations of all possible cliques in the graph, as well as for checking whether the graph is a tree.

Keywords: graph theory, multidimensional matrices, clique, graph tree

For citation: Makarov A. I., Munerman V. I. Application of $(0, \mu)$ convoluted product of multidimensional matrices for graph theory problems solving. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 659–669. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-659-669>. – EDN: LTDFVW.

Введение. К задачам теории графов относятся, например, раскраска графа, которая отвечает за разделение множества на группы. Такое разделение используется в задачах проектирования – от распределения рабочих смен и занятий в университете до расстановки вышек сотовой связи в мегаполисах. Задача поиска клики, или полных подграфов, менее известная, но не менее используемая, так как под кликой (множество вершин графа, где каждая связана с каждой) может пониматься и множество узлов печатной платы, и множество людей для построения системы рекомендаций, и любое другое связанное между собой множество. Поиск путей в графе является ключевым алгоритмом для любых навигационных систем. Для их решения найдено множество эвристических алгоритмов, дающих точные или приблизительные ответы за удовлетворительное время. Однако эти алгоритмы подходят только для части задачи: ищут одно разбиение на группы, не учитывая любые другие; находят одну из самых больших клик, игнорируя любые меньшие; осуществляют поиск кратчайшего пути между вершинами, но он не сообщает кратчайшего пути из каждой вершины в каждую. Существует алгоритм, проверяющий, достижима ли одна вершина из другой, но он не проверяет граф на связность и т. д. Применяя алгебру многомерных матриц, можно получить решения различных задач

в общем виде, а не для конкретных частей графа. Матрица – одно из стандартных представлений данных о графе, поэтому можно считать полным соответствие модели данных модели вычислений [1].

Основные понятия алгебры многомерных матриц. Определение многомерной матрицы и операции (λ, μ) -свернутого произведения многомерных матриц приведено в том виде, в каком оно дано в теории многомерных матриц [2]. Сделаем некоторые расширения и уточнения, ориентированные на реализацию алгоритмов построения маршрутов в графе и параллельную их реализацию.

Многомерная матрица определяется как система $(n_1 \times \dots \times n_p)$ элементов $A_{i_1 \dots i_p}$ ($i_\alpha = 1, \dots, n_\alpha$, $\alpha = 1, \dots, p$), расположенных в точках p -мерного пространства, определяемых координатами i_1, \dots, i_p , и обозначается $A = \|a_{i_1 \dots i_p}\|$. В работе [3] показано, что элементы матриц могут быть произвольных типов. К ним предъявляется единственное требование: в типе должны быть определены две бинарные операции, одна из которых трактуется как аддитивная, а другая – как мультипликативная.

Для решения поставленной задачи рассмотрим частный случай операции умножения многомерных матриц [4, 5]. Пусть даны p -мерная матрица $A = \|a_{i_1 \dots i_p}\|$ и q -мерная матрица $B = \|b_{i_1 \dots i_q}\|$. Совокупности индексов i_1, \dots, i_p и i_1, \dots, i_q можно разбить на четыре группы, содержащие соответственно κ , λ , μ и ν индексов ($\kappa, \lambda, \mu, \nu \geq 0$). Причем $\kappa + \lambda + \mu = p$, а $\lambda + \mu + \nu = q$. Разбиение порождает четыре группы индексов: $l = (l_1, \dots, l_\kappa)$, $s = (s_1, \dots, s_\lambda)$, $c = (c_1, \dots, c_\mu)$ и $m = (m_1, \dots, m_\nu)$. Индексы разбиений s и c принадлежат обеим матрицам. Тогда матрицы A и B можно представить в виде $A = \|a_{lsc}\|$ и $B = \|b_{scm}\|$. Очевидно, что если индексу s_γ (c_γ) соответствуют индекс i_α в матрице A и индекс i_β в матрице B , то $n_{i_\alpha} = n_{i_\beta}$. Индексы разбиения c называются кэлиевыми, индексы разбиения s – скоттовыми, а индексы разбиения l , так же как и индексы разбиения m , – свободными.

Матрица $C = \|C_{lsm}\|$, элементы которой вычисляются по формуле $c_{lsm} = \sum_{(c)} a_{lsc} \times b_{scm}$, называется (λ, μ) -свернутым произведением матриц A и B и обозначается ${}^{\lambda, \mu}(A \times B)$.

Из определения следует, что при различных сочетаниях параметров λ и μ результат произведения матриц размерностей p и q может иметь размерность от нуля до $p + q$, т. е. от скаляра до декартова произведения множеств элементов обеих матриц [6].

Анализ задач на графах с использованием многомерных матриц. При проектировании вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей важную роль играет грамотное распределение нагрузки. Для одних задач это может быть неравномерное распределение (когда отдельные части системы более производительны и получают большую нагрузку), для других – равномерное (когда предполагается, что все элементы системы равнозначны и нагрузка распределяется поровну).

В приборостроении большое значение имеют размерные цепи, необходимые для проектирования деталей и определения технологического процесса их производства [7, 8]. Без автоматизации анализа размерных цепей точность вычислений зависит от способности технолога удерживать в уме все детали и все связи между ними. Но если узлы системы или детали имеют между собой определенные связи, влияющие на производительность или доступность для получения отдельных задач, то такие подходы неэффективны.

В данных случаях рассматриваемые узлы укрупняются до подсистем / блоков. Они могут быть разного размера, а также разной связности как внутри подсистемы, так и вне ее. Наиболее часто встречающиеся подсистемы представляют собой полностью связанные группы узлов, имеющие неполные связи с другими группами. Под неполной связью понимается отсутствие связи хотя бы у одной пары вершин, принадлежащих разным группам. Однако разбиение на полностью связанные подсистемы может произойти так, что у двух и более подсистем будет общая часть узлов, что создаст сложности при распределении нагрузки в системе. Для исключения таких случаев следует для всех возможных разбиений проверять наличие пересечений у подсистем.

Другим важным моментом, который необходимо учитывать при проектировании, является связность графа – возможность из любой его вершины достигнуть любой другой его вершины, передвигаясь по ребрам графа. В электронике это соответствует «цельности» изготавливаемого устройства, чтобы никакой его элемент или узел не был изолированным.

С помощью матричного способа представления графа возможно хранение информации обо всех возможных разбиениях. Матрица смежности графа G , представляющая собой двумерную матрицу размера $n \times n$, является также матрицей, содержащей информацию обо всех кликах размера 2. При этом на главной диагонали той части матрицы, где равные значения индексов, хранится информация обо всех кликах размера 1 – вершинах с петлями [9–11].

Задача 1. Поиск пересекающихся клик в графе. На рис. 1 изображен граф с матрицей смежности G :

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Требуется определить все клики в графе и сохранить данные для обработки с помощью вычислительной техники в дальнейшем.

Существуют эвристические алгоритмы поиска клики наибольшего размера в графе. Однако они не дают точного ответа относительно существования других клик такого же размера в графе, а также существования клик меньшего размера. Помимо этого эвристические алгоритмы требуют искусственных приемов для распараллеливания, без которого невозможно получение эффективной скорости выполнения анализа в современных системах с большими объемами данных, в то время как распараллеливание многомерных матриц выполняется стандартными алгоритмами Кэннона или Фокса. Так как задача поиска клики является NP-полной, ограничимся предположением, что существует возможность поиска всех клик графа с помощью алгебры многомерных матриц [12].

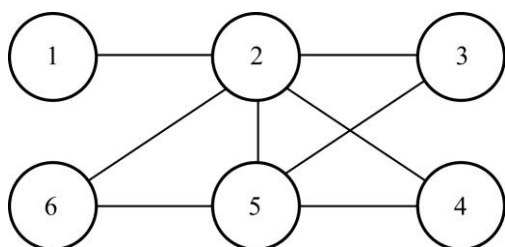


Рис. 1. Граф G для задачи 1
Fig. 1. Graph G for task 1

Каждое ребро данного графа является кликой размера 2. Кликкой размера 3 является, например, подграф, состоящий из вершин 2, 5, 6, образующих на рисунке треугольник, кликой размера 4 – подграф из вершин 2, 3, 4, 5. Клик большего размера в данном графе не существует.

k -мерная матрица смежности – обобщение данной формы записи. Элемент с индексами i_1, i_2, \dots, i_k содержит информацию о том, является ли множество вершин $v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_k}$ кликой. Важно отметить, что в случае равенства отдельных индексов размерность клики становится меньше, а значит, в k -мерной матрице содержится информация обо всех кликах, размером не превышающих k . Для приведенного примера четырехмерной матрицей, содержащей информацию о кликах, будет матрица G_4 . Ненулевыми в данной матрице будут элементы главной диагонали $g_{1,1,1,1}, g_{2,2,2,2}, g_{3,3,3,3}, g_{4,4,4,4}, g_{5,5,5,5}, g_{6,6,6,6}$, как содержащие информацию о кликах размера 1; элементы с двумя различающимися индексами i_1, i_2 при условии, что $g_{i_1 i_2} = 1$, например $g_{1,1,2,2}, g_{3,4,3,3}$ и другие, которые содержат информацию обо всех кликах размера 2; элементы с тремя разными индексами i_1, i_2, i_3 при условии, что $g_{i_1 i_2} = 1, g_{i_1 i_3} = 1, g_{i_2 i_3} = 1$, например $g_{5,6,2,2}, g_{3,4,3,2}$ и другие, которые содержат информацию о кликах размера 3; ключевые элементы, отличающие четырехмерную матрицу G_4 от трехмерной G_3 ; элементы с четырьмя различными индексами, содержащие информацию обо всех кликах размера 4, для любой пары из которых элемент двумерной матрицы G равен единице, в данном случае это все комбинации индексов 2, 3, 4, 5: $g_{2,3,4,5}, g_{3,4,2,5}$ и другие.

Отметим, что хранение многомерной матрицы для графов с большим числом вершин может обусловить большой объем памяти. Однако ввиду использования в матрицах только единиц и нулей существует возможность хранения их в байтовом представлении, где каждый элемент матрицы требует всего 1 бит памяти. Вычислительная сложность компенсируется вариантами распараллеливания вычислений, которые для умножения многомерных матриц хорошо изучены [13–16].

Имея информацию о возможных полных подграфах, можно построить разбиение графа на подграфы. Однако, имея разбиение графа на подграфы, сложно сказать, сколько из них пересекаются и как много общих вершин имеют [17]. В данном случае возможно использовать $(0, \mu)$ -квадрат многомерных матриц.

Элементы $(0, \mu)$ -квадрата k -мерной матрицы G вычисляются следующим образом:

$$c_{i_1, i_2, \dots, i_{(k-\mu)}, i_{\mu+1}, i_{\mu+2}, \dots, i_k} = \sum_{j_1, j_2, \dots, j_\mu} g_{i_1 i_2, \dots, i_{k-\mu}, j_1, j_2, \dots, j_\mu} \times g_{j_1 j_2, \dots, j_\mu, i_{\mu+1}, i_{\mu+2}, \dots, i_k}.$$

Результирующая матрица C имеет размерность $2k - 2\mu$ и содержит информацию обо всех пересечениях размера μ между кликами размера k . При этом в записи не указывается не только число пересечений, но и полная клика, но указываются обе группы вершин, имеющие смежную группу в μ вершин.

Тривиальным примером будет возведение в $(0, 1)$ -квадрат классической (двумерной) матрицы смежности. Исходя из определения результирующей матрицей будет двумерная матрица C с элементами $c_{i_1 i_2} = \sum_j g_{i_1 j} \times g_{j i_2}$. Элемент $c_{i_1 i_2}$ может принимать значение больше единицы только при существовании таких пар $g_{i_1 j} \times g_{j i_2}$, в которых

оба элемента равны 1. А значит, $c_{i_1 i_2}$ указывает число вершин, смежных одновременно вершине с номером i_1 и вершине с номером i_2 . Для задачи 1 результирующей матрицей C будет трехмерная матрица, состоящая из одних единиц, так как вершина с номером 2 смежна всем вершинам графа и, соответственно, $c_{i_1 i_2} = g_{i_1,2} \times g_{2,i_2} = 1$.

Задача 2. Построение матрицы смежности. Для графа, имеющего малое число ребер, получим многомерную матрицу смежности графа [18] (рис. 2). Матрицей смежности данного графа является матрица G :

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

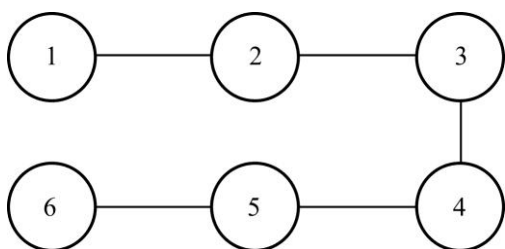


Рис. 2. Граф G для задачи 2
Fig. 2. Graph G for task 2

Так как в задаче заранее известно, что у графа имеется малое число ребер, матрица смежности разреженная, что позволяет гомоморфной алгебре многомерных матриц использовать реляционную алгебру [1], которая дает возможность при практической реализации наиболее эффективно обрабатывать разреженные матрицы.

При возведении матрицы G в $(0, 1)$ -квадрат результирующая матрица не будет тривиальной. Матрица C будет иметь следующий вид:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

В общем виде элемент $c_{i_1 i_2 \dots i_{k-\mu} i_{\mu+1} i_{\mu+2} \dots i_k}$ указывает на число общих клик размера μ между кликами, состоящими из вершин $i_1, i_2, \dots, i_{k-\mu}$ и $i_{\mu+1}, i_{\mu+2}, \dots, i_k$.

Рассмотрим частный случай $(0, \mu)$ -свернутого произведения – $(0, 1)$ -свернутое произведение, если речь идет о возведении с его помощью матрицы смежности графа в степень. Результат возведения в $(0, 1)$ -квадрат матрицы смежности графа – двумерная матрица, элементы которой находятся по следующему правилу: $c_{i_1 i_2} = \sum_j g_{i_1 j} \times g_{j i_2}$.

Каждый элемент $c_{i_1 i_2}$ показывает число вершин графа G , смежных вершинам с номерами i_1, i_2 . Но не всегда необходимо знать число соседей. Если достаточно просто знать, имеется ли в графе вершина, смежная двум заданным, формулу можно дополнить:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \sum_{k=1}^n g_{ik} \times g_{kj} > 0, \\ 0, & \sum_{k=1}^n g_{ik} \times g_{kj} = 0. \end{cases}$$

Однако если требуется проверить вершины на связность, данный вариант не подойдет: связанные напрямую вершины либо имеющие связь более чем через одну вершину не будут считаться связными. Для исправления первого пункта (прямой связности) достаточно заменить формулу на следующую:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \sum_{k=1}^n g_{ik} \times g_{kj} > 0, \\ 0 + g_{ij}, & \sum_{k=1}^n g_{ik} \times g_{kj} = 0. \end{cases}$$

Элемент g_{ij} можно внести под знак суммы, это не играет существенной роли, важно его учесть. Таким образом, матрица, состоящая из элементов c_{ij} , представляет собой матрицу связности вершин не более чем через два ребра. При возведении данной матрицы в квадрат по той же формуле получаем элементы c_{1ij} , характеризующие связность вершин не более чем через четыре ребра. Задача 1 не представляет интереса для рассмотрения, так как матрица C уже не содержит нулевых элементов. Для задачи 2 рассмотрим результирующие матрицы C и C_1 :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица C_1 свидетельствует о том, что между всеми вершинами графа, кроме 1 и 6, можно построить путь не длиннее четырех ребер. При этом, если матрицу C_1 возвести в квадрат, результирующая матрица будет состоять из элементов c_{2ij} , характеризующих связность вершин не более чем через восемь ребер, так как для каждой вершины добавляются вершины, достижимые не более чем через четыре ребра от каждой достижимой вершины, а до самой удаленной – не более чем через четыре ребра.

В общем виде для k -го возведения в квадрат результирующая матрица будет содержать элементы, характеризующие достижимость вершин не более чем через 2^{k+1} ребер. Используя данный способ, возможно проверять связность графа, не выходя за

рамки алгебры многомерных матриц. Зная, что наибольшее число ребер между двумя вершинами в графе, содержащем n вершин, не превосходит $n - 1$, для проверки связности достаточно провести $\log_2(n - 1)$ возведение в квадрат. При этом сложность каждого возведения соответствует сложности произведения матриц $O(n^3)$. Итоговая сложность проверки на связность графа не превосходит $O(n^3 \log_2(n - 1)) \approx O(n^3)$.

Задача 3. Поиск комбинаций всех клик. Для многомерной матрицы определим число всех возможных комбинаций клик размера не более k в графе [19]. Следует рассмотреть $(0, k)$ -квадрат k -мерной матрицы, содержащей информацию обо всех кликах размера не более k . Начнем с тривиального случая – матрицы смежности и $(0, 2)$ -квадрата. Результат данного действия – число $c = \sum_{j_1, j_2} g_{j_1 j_2} \times g_{j_1 j_2}$.

Для каждого отдельно зафиксированного значения j_1 или j_2 результатом суммы будет степень вершины с зафиксированным номером, а значит, перебор по данной величине даст сумму степеней всех вершин графа, что для ориентированного графа равно числу ребер, а для неориентированного – удвоенному числу ребер. Для задачи 1 результатом будет число 18, для задачи 2 – число 10.

Задача 4. Определение типа графа. Определим, является ли граф деревом [20]. Следует подробнее рассмотреть применение $(0, 2)$ -квадрата матрицы смежности графа. Данное значение можно использовать как вариант проверки графа на то, является ли он деревом: по определению, когда у связного графа равное число вершин и ребер, он является деревом. Такая проверка позволяет отнести граф к хорошо изученному классу деревьев, при этом не выходя за операции алгебры многомерных матриц и не используя эвристических алгоритмов.

Таким образом, используя только математический аппарат алгебры многомерных матриц, возможно проверить, является ли граф деревом, а если нет, то является ли он связным. А в дальнейшем с помощью $(0, \mu)$ -свернутого произведения матриц находить пересечения среди клик графа.

Заключение. Рассмотренные задачи имеют эвристические алгоритмы решения, однако использование алгебры многомерных матриц позволяет решать без приближенных вычислений сразу все семейство поставленных задач: найти не только наибольшее пересечение у клик графа, но и все пересечения; проверить достижимость между одной парой вершин, а также между всеми парами сразу, что позволяет определить связность графа. С помощью алгебры многомерных матриц возможно определять отдельные свойства графов, не расширяя математический аппарат построенной модели данных, если перед ней ставятся другие задачи теории графов. При этом получение результатов сразу для всех деталей и их групп со счетной сложностью алгоритма более эффективно, чем применение эвристических алгоритмов к каждой конкретной вершине по отдельности.

Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс проектирования приборов в рамках построения и анализа размерных цепей, определять пересекающиеся подмножества в сфере приложения задачи (от распределения нагрузки на производственные мощности до построения рекомендательных систем), выявлять свойства построенной модели данных и выбирать оптимальные алгоритмы решения поставленных задач.

Литература

1. **Мунерман В. И., Мунерман Д. В.** О соответствии моделей данных и моделей вычислений // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XXII Междунар. науч. конф. Вып. 22. Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2021. С. 146–152. EDN: PVXDHB.
2. **Соколов Н. П.** Введение в теорию многомерных матриц. Киев: Наукова думка, 1972. 175 с.
3. **Левин Н. А., Мунерман В. И.** Модели обработки больших объемов данных в системах массового параллелизма // Системы высокой доступности. 2013. Т. 9. № 1. С. 35–43. EDN: PYFMXZ.
4. **Мунерман В. И.** Архитектура программно-аппаратного комплекса для массовой обработки данных на базе многомерно-матричной модели // Системы высокой доступности. 2015. Т. 11. № 2. С. 13–18. EDN: UBGEKV.
5. **Захаров В. Н., Мунерман В. И.** Параллельный алгоритм умножения многомерных матриц // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. Т. 11. № 2. С. 384–390. EDN: WAQFMJ.
6. **Морозов С. А., Мунерман В. И., Симаков В. А.** Экспериментальный анализ многомерно-матричного подхода к построению маршрутов в графе // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 676–686. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-676-686>. – EDN: EXAWHR.
7. **Леонов Ю. А.** Автоматизация выбора рациональных схем базирования заготовки при синтезе технологических процессов: дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2012. 175 с.
8. **Петухов А. В., Мельников Д. В., Быстренков В. М.** Системы автоматизированного проектирования технологических процессов. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. 143 с.
9. **Зыков А. А.** Теория конечных графов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1969. Т. 1. 542 с.
10. **Татт У.** Теория графов / пер. с англ. Г. П. Гаврилова. М.: Мир, 1988. 424 с.
11. **König D.** Gráfok és mátrixok // Matematikai és Fizikai Lapok. 1931. Évf. 38. P. 116–119.
12. **Макаров А. И., Мунерман В. И.** Использование многомерных матриц для определения параметров графа // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18. № 3. С. 537–544. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.537-544>. – EDN: ZZSZDY.
13. **Захаров В. Н., Мунерман В. И.** Параллельная реализация обработки интенсивно используемых данных на основе алгебры многомерных матриц // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных (DAMDID/RCDL). Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 217–223.
14. **Munerman V., Munerman D.** An axiomatic approach to the data models formalization for mass data processing // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2020. P. 1996–2000. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039205>
15. **Малышев А. В.** Параллелизация умножения матриц // Электроника и информационные технологии: электрон. журн. 2008. № 2 (4). URL: http://fetmag.mrsu.ru/2008-2/pdf/15_ParallelCalc.pdf (дата обращения: 07.02.2021).
16. **Гончаров Е. И.** Реализация (λ, μ) -свернутого произведения многомерных матриц средствами операции `tensor_dot` из библиотек для тензорной алгебры // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18. № 4. С. 781–789. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202204.781-789>. – EDN: CSWVOH.
17. **Choi J., Walker D. W., Dongarra J. J.** PUMMA: Parallel universal matrix multiplication algorithms on distributed memory concurrent computers // Concurrency: Pract. Exper. 1994. Vol. 6. Iss. 7. P. 543–570. <https://doi.org/10.1002/cpe.4330060702>
18. **Емельченков Е. П., Мунерман В. И., Мунерман Д. В., Самойлова Т. А.** Один метод построения циклов в графе // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2021. Т. 17. № 4. С. 814–823. <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.814-823>. – EDN: JOCFXP.
19. **Moore J. W., Moser L.** On cliques in graphs // Israel J. Math. 1965. Vol. 3. P. 23–28. <https://doi.org/10.1007/BF02760024>
20. **Демидова А. А.** Автоматный анализ свойств графа быть деревом и псевдодеревом // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2021. Т. 25. № 2. С. 111–127. EDN: EGAQBJ.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.03.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Макаров Александр Ильич – аспирант кафедры прикладной математики и информатики Смоленского государственного университета (Россия, 214000, Смоленск, ул. Пржевальского, 4), al.makarov8@yandex.ru

Мунерман Виктор Иосифович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Смоленского государственного университета (Россия, 214000, Смоленск, ул. Пржевальского, 4), vimoona@gmail.com

References

1. Munerman V. I., Munerman D. V. About the correspondence of data models and calculation models. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya, materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf.* Iss. 22. Smolensk, Smolensk State Univ. Publ., 2021, pp. 146–152. (In Russian). EDN: PVXDBH.
2. Sokolov N. P. *Introduction to the theory of multidimensional matrices*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1972. 175 p. (In Russian).
3. Levin N. A., Munerman V. I. Models of big data processing in massively parallel systems. *Sistemy vysokoy dostupnosti = Highly Available Systems*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 35–43. (In Russian). EDN: PYFMXZ.
4. Munerman V. I. Construction of hardware-software complexes architecture to improve massively data processing. *Sistemy vysokoy dostupnosti = Highly Available Systems*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 13–18. (In Russian). EDN: UBGEKV.
5. Zakharov V. N., Munerman V. I. Parallel algorithm for multiplying multidimensional matrices. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 384–390. (In Russian). EDN: WAQFMJ.
6. Morozov S. A., Munerman V. I., Simakov V. A. Experimental analysis of multidimensional matrix approach to constructing routings in a graph. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 676–686. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-676-686>. – EDN: EXAWHR.
7. Leonov Yu. A. *Automation of the choice of rational locating chart of billet during the synthesis of technological processes*, diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Bryansk, 2012. 175 p. (In Russian).
8. Petukhov A. V., Mel'nikov D. V., Bystrenkov V. M. *Systems of computer-aided design of technological processes*. Gomel, Sukhoi State Technical Univ. of Gomel, 2011. 143 p. (In Russian).
9. Zykov A. A. *Theory of finite graphs*. Novosibirsk, Nauka. Sib. otd-nie Publ., 1969. Vol. 1. 542 p. (In Russian).
10. Tutte W. T. *Graph theory*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1984. 440 p.
11. König D. Gráfok és mátrixok. *Matematikai és Fizikai Lapok*, 1931, évf. 38, pp. 116–119.
12. Makarov A. I., Munerman V. I. Using multidimensional matrices to determine graph properties. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*, 2022, vol. 18, no. 3, pp. 537–544. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.537-544>. – EDN: ZZSZDY.
13. Zakharov V. N., Munerman V. I. Parallel implementation of intensive data processing based on multidimensional matrix algebra. *Analitika i upravlenie dannymi v oblastiakh s intensivnym ispol'zovaniem dannykh (DAMDID/RCDL)*. Obninsk, IATE MEPhI, 2015, pp. 217–223. (In Russian).
14. Munerman V., Munerman D. An axiomatic approach to the data models formalization for mass data processing. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2020, pp. 1996–2000. <https://doi.org/10.1109/EConRus49466.2020.9039205>
15. Malyshev A. V. Parallelization of matrix multiplication. *Elektronika i informatsionnye tekhnologii = Electronics and Information Technologies*, 2008, no. 2 (4). (In Russian). Available at: http://fetmag.mrsu.ru/2008-2/pdf/15_ParallelCalc.pdf (accessed: 07.02.2021).
16. Goncharov E. I. Implementation of (λ, μ) -convolution product by means of tensordot operation from libraries for tensor algebra. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 781–789. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202204.781-789>. – EDN: CSWVOH.
17. Choi J., Walker D. W., Dongarra J. J. Puma: Parallel universal matrix multiplication algorithms on distributed memory concurrent computers. *Concurrency: Pract. Exper.*, 1994, vol. 6, iss. 7, pp. 543–570. <https://doi.org/10.1002/cpe.4330060702>

18. Emelchenkov E. P., Munerman V. I., Munerman D. V., Samoylova T. A. Some method for constructing cycles in a graph. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 814–823. <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.814-823>. – EDN: JOCFXP.

19. Moon J. W., Moser L. On cliques in graphs. *Israel J. Math.*, 1965, vol. 3, pp. 23–28. <https://doi.org/10.1007/BF02760024>

20. Demidova A. A. Automaton analysis of the properties of a graph to be a tree and a pseudo-tree. *Intellektual'nye sistemy. Teoriya i prilozheniya*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 111–127. (In Russian). EDN: EGAQBJ.

The article was submitted 20.02.2023; approved after reviewing 30.03.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Aleksander I. Makarov – PhD student of the Applied Mathematics and Informatics Department, Smolensk State University (Russia, 214000, Smolensk, Przhevalsky st., 4), al.makarov8@yandex.ru

Victor I. Munerman – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Applied Mathematics and Informatics Department, Smolensk State University (Russia, 214000, Smolensk, Przhevalsky st., 4), [Przhevalsky st., 4\), vmoon@gmail.com](mailto:vmoon@gmail.com)

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы»
ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство
«Книга-Сервис». Подписной индекс 38934
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: <http://presskiosk.ru/categories>
- через редакцию – с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: www.rucont.ru; www.akc.ru;
www.pressa-rf.ru
- ООО «Урал-Пресс Округ»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru

Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету I. Структуры на основе дублирования и метода логической коррекции сигналов

Д. В. Ефанов^{1,2}, Т. С. Погодина²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

²Российский университет транспорта, г. Москва, Россия

TrES-4b@yandex.ru

Аннотация. Отказоустойчивые цифровые устройства синтезируют, как правило, с применением методов модульной избыточности и помехоустойчивого кодирования состояний. Однако такие подходы не учитывают специфики структур исходных объектов. Решение задачи синтеза отказоустойчивых устройств может быть найдено за счет применения при их построении схем встроенного контроля и метода логической коррекции сигналов при синтезе блока фиксации искаженных сигналов. В работе для сокращения структурной избыточности отказоустойчивого устройства использованы методы булевой алгебры, теории информации и кодирования. Рассмотрены самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету, которые функционируют в импульсном режиме и требуют для работы временной избыточности. Применение таких структур может служить альтернативой использованию метода внесения тройной модульной избыточности и коррекции ошибок мажоритарными элементами. Представленные структуры выполнены с контролем вычислений основным (исходным) устройством либо дополнительным со схемой сжатия по паритету и с преобразованием единственного контрольного сигнала в самодвойственный сигнал. Для двух самодвойственных структур использовано дублирование с дополнительным контролем вычислений, для трех других структур использован метод логической коррекции сигналов при реализации блока фиксации искаженных сигналов без применения методов внесения модульной избыточности. Для каждой самодвойственной отказоустойчивой структуры приведены выражения с целью определения показателей сложности их реализации в общем виде. Даны выражения для оценки эффективности применения каждой из структур. Установлено, что описанные самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету во многих случаях дают более простые с точки зрения избыточности устройства, чем структуры, выполненные по традиционному методу внесения тройной модульной избыточности с мажоритарной коррекцией сигналов. Они могут быть использованы на практике при создании вычислительных устройств и систем на современной программируемой элементной базе.

Ключевые слова: отказоустойчивые устройства, самодвойственные устройства, коррекция ошибок, контроль вычислений по паритету, самодвойственное тестирование

Для цитирования: Ефанов Д. В., Погодина Т. С. Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. I. Структуры на основе дублирования и метода логической коррекции сигналов // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 670–686. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-670-686>. – EDN: JSSLNH.

Original article

Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code I. Structures based on duplication and the Boolean signals correction method

D. V. Efanov^{1,2}, T. S. Pogodina²

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

²*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

TrES-4b@yandex.ru

Abstract. Fault-tolerant digital devices are usually synthesized with methods of modular redundancy and antinoise state coding. Researches show that such approaches have no consideration for the specifics of the original objects' structures. The solution to the problem of synthesis of fault-tolerant devices can be found through the use of concurrent error-detection circuit with their construction and applying the method of Boolean signals correction in the synthesis of the block for fixing distorted signals. In this work, in order to reduce the structural redundancy of the fault-tolerant device the methods of Boolean algebra, information and coding theory are used. Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code that operate in pulse mode and require temporary redundancy for operation are considered. The presented structures can serve as an alternative to the method of introducing triple modular redundancy and error correction using majority elements. All presented structures are implemented with the calculations checking by the main (source) device, or an additional one with a parity compression circuit and with the conversion of a single check signal into a self-dual signal. Two of the presented self-dual structures implement the idea of duplication with additional calculations checking, the other three are based on the use of Boolean signals correction method when implementing a block for fixing distorted signals and do not imply the use of modular redundancy methods. For each of the self-dual fault-tolerant structures, expressions are given to determine the indicators of the complexity of technical implementation in a general form. Expressions are given to evaluate the effectiveness of each of the structures. It has been established that the described self-dual fault-tolerant structures with parity calculations checking in many cases provide simpler devices in terms of redundancy than those implemented using the traditional method of introducing triple modular redundancy with majority

correction of signals. They can be used in practice when implementing computing devices and systems on a modern programmable element base.

Keywords: fault-tolerant devices, self-dual devices, error correction, calculations checking by parity code, self-dual testing

For citation: 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. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 670–686. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-670-686>. – EDN: JSSLNH.

Введение. Устройства и системы критического применения в области промышленности и транспорта должны отвечать заданным требованиям функциональной безопасности [1, 2]. Для этого необходимо применение методов аппаратного, программного, параметрического резервирования и диверсной защиты, технического диагностирования, синтеза устройств с контролепригодными, самопроверяемыми и отказоустойчивыми структурами, а также помехозащищенного и помехоустойчивого кодирования, методов контроля вычислений и т. д. [3–8].

Важное направление в обеспечении высокой надежности и безопасности систем критического применения – синтез отказоустойчивых устройств. Как правило, применяются архитектуры, основанные на методах внесения модульной избыточности для достижения свойства отказоустойчивости структур и методах контроля вычислений. Например, в управляющих комплексах для железнодорожного транспорта широко применяются такие известные архитектуры, как 1002, 2003 и 1002D, использующие соответственно два, три и четыре блока, реализующие одинаковые функции, с последующей проверкой вычислений [9, 10]. Именно за счет внесения существенной избыточности достигается свойство «нечувствительности» к отказам. Исследования показывают, что возможно построение отказоустойчивых устройств и систем, в которых не используется прямое внесение модульной избыточности, а применяются методы синтеза самопроверяемых устройств на основе помехозащищенного кодирования [11]. При этом множество покрываемых неисправностей ограничивается (однако для реальных устройств оно также ограничено) какой-либо моделью неисправностей, а структура выполняется отказоустойчивой в предположении, что возможны одиночные неисправности в каком-либо из ее блоков. Одним из подходов к построению устройств с обнаружением неисправностей является использование свойств самодвойственных булевых функций [12], что требует внесения временной избыточности и использования импульсных режимов функционирования. Как показано в работе [13], это, в свою очередь, позволяет повышать показатели контролепригодности, что крайне важно для устройств и систем критического применения, входные данные для которых меняются не так часто. К ним относятся, например, железнодорожные управляющие комплексы электрической централизации стрелок и сигналов [14].

В настоящей работе рассматриваются самодвойственные отказоустойчивые структуры, реализованные без применения методов внесения модульной избыточности, а также исследуются их характеристики. Такие структуры синтезируются на основе метода логической коррекции сигналов для построения схем контроля и фиксации искаженных сигналов.

Самодвойственные устройства. Устройства, выходы которых описываются самодвойственными булевыми функциями, называются самодвойственными [15]. Самодвойственные устройства менее многообразны по сравнению с устройствами, на выходах которых формируются произвольные булевы функции. Свойство само-

двойственности реализуемых функций присуще простым цифровым устройствам, таким, например, как устройства контроля вычислений по модулю $M = 2$ с нечетным числом входов, полные сумматоры, мажоритарные элементы и др.

Цифровые устройства могут характеризоваться индексом самодвойственности $I_\sigma \in [0, 1]$, показывающим, насколько исходная схема устройства близка к самодвойственной [16]. Так как любую булеву функцию можно преобразовать в самодвойственную с помощью всего одной переменной, возможно получить для любой схемы ее самодвойственную реализацию [17]. Очевидно, что для схем с высокими показателями I_σ самодвойственное преобразование более простое, чем для схем с низкими показателями I_σ .

В работе [17] доказано, что полностью определенный конечный автомат является самодвойственным, если его комбинационная часть самодвойственна. Неполностью определенный конечный автомат является самодвойственным, если его комбинационная часть самодвойственна и выполняется следующее условие для любой пары $X\varphi \subset \Psi$, где X – входная последовательность; $\varphi = Y_1 Y_2 \dots Y_k$ – состояние автомата ($Y_i, i = \overline{1, k}$, – внутренние переменные): $\overline{X\varphi} \subset \Psi$; Ψ – область определения автомата. В этой же работе приведены самодвойственные модификации простейших конечных автоматов – триггеров. Отдельным направлением в исследованиях самодвойственных устройств является изучение особенностей синтеза самопроверяемых схем встроенного контроля по признаку самодвойственности вычисляемых функций. Например, в работе [18] описана самодвойственная структура самопроверяемого конечного автомата и обсуждены результаты ее применения. Показано, что для использованной выборки тестовых конечных автоматов при реализации самодвойственного самопроверяемого автомата при усложнении примерно в 2,2 раза удается обнаружить 97,5 % неисправностей функциональных элементов и 98,9 % неисправностей входных линий. В работе [19] продолжены исследования синтеза устройств с обнаружением неисправностей и рассмотрены методы реализации самодвойственных самопроверяемых конечных автоматов и более подробно Т-триггера, отмечены преимущества самодвойственных и парафазных схем, обусловленные возможностью обнаружения неисправностей соединительных линий.

Свойства самодвойственных функций могут эффективно использоваться при синтезе не только самопроверяемых устройств, но и отказоустойчивых. Например, в работе [20] описана структура с коррекцией ошибок, основанная на использовании самодвойственного дополнения с контролем вычислений основным устройством и специализированных корректоров сигналов, в [21] – структура с коррекцией ошибок, основанная на использовании самодвойственного дополнения совместно с дублированием исходного устройства.

Самодвойственные отказоустойчивые структуры на основе дублирования с контролем вычислений по паритету. Для разработки отказоустойчивых устройств широко используется структура, основанная на тройной модульной избыточности и мажоритарной коррекции ошибок [22, 23]. Она имеет свойство коррекции любых одиноких неисправностей в каком-либо из блоков. Исключение составляют элементы коррекции – мажоритарные элементы, проявления неисправностей выходных элементов которых не будут обнаружены, что повлияет и на саму процедуру коррекции. Однако для исключения этого на практике используются высоконадежные мажоритарные элементы [4].

Недостаток структуры с тройной модульной избыточностью в том, что в ней для коррекции ошибок применяются три одинаковых исходных блока $F(x)$. С точки зрения

проектирования это – преимущество, однако с точки зрения сложности реализации конечного устройства – явный недостаток, поскольку показатели сложности реализации отказоустойчивого устройства более чем втрое превышают показатели сложности исходного устройства. Уменьшить показатели сложности реализации можно за счет применения метода, основанного на дублировании с контролем вычислений. На рис. 1 приведены самодвойственные отказоустойчивые структуры на основе дублирования с контролем вычислений.

Для коррекции сигналов в данных структурах не используется свойство, известное из теории кодирования, согласно которому для исправления ошибки кратностью d необходимо выполнение условия $d_{\min} \geq 2d + 1$, где d_{\min} – расстояние Хэмминга (в случае однократной ошибки $d_{\min} \geq 3$). Это требует создания схемы встроенного контроля (СВК) для основного блока $F(x)$ или для дополнительного.

СВК строится с применением схемы сжатия сигналов с выходов f_1, f_2, \dots, f_m , вычисляемых основным или дополнительным устройством, по паритету $\psi = f_1 \oplus f_2 \oplus \dots \oplus f_{m-1} \oplus f_m$ с дальнейшим преобразованием функции паритета в самодвойственную булеву функцию по формуле $v = \psi \oplus \delta$, где δ – функция самодвойственного дополнения (использован метод самодвойственного паритета [24]). Функция дополнения вычисляется блоком самодвойственного дополнения $\Delta(x)$. Контроль самодвойственности сигнала v осуществляется с использованием тестера самодвойственности SSC (Self-Checking Self-Dual Checker), работа которого описана в [25]. На выходах z^0 и z^1 формируется парафазный сигнал $\langle 01 \rangle$ или $\langle 10 \rangle$ в случае корректности вычислений. Нарушение парафазности свидетельствует о наличии ошибки в вычислениях. Двухпроводной сигнал $\langle z^0 z^1 \rangle$ преобразуется на выходах СВК в однопроводной с использованием одного элемента XOR: $\varepsilon = z^0 \oplus z^1$. Данный сигнал является сигналом ошибки: при $\varepsilon = 1$ ошибки нет (либо она маскируется), а при $\varepsilon = 0$ ошибка зафиксирована. Сигнал ошибки служит для активации работы блока коррекции сигналов. Для правильной коррекции устанавливается каскад сравнения сигналов с одноименных выходов основного и дополнительного блоков $F(x)$ – каскад двухвходовых элементов XOR a_i , $i = \overline{1, m}$. Если $a_i = 1$, то фиксируется ошибка на выходе данного элемента сравнения $e_i = 1$.

В структуре, приведенной на рис. 1, а, СВК установлена для определения корректности вычислений основным устройством, поэтому сигнал ошибки на ее выходе $\varepsilon = 0$ должен являться сигналом активации работы блока коррекции сигналов. С этой целью он предварительно инвертируется. Блок коррекции сигналов образован элементами выбора корректируемых функций – AND и XOR d_i , $i = \overline{1, m}$, для каждой функции. Активация коррекции осуществляется в том случае, если на i -м элементе AND сформирован сигнал логической единицы.

В структуре, приведенной на рис. 1, б, СВК контролирует вычисления на выходах дополнительного устройства. Оно необходимо только для контроля, поэтому при его ошибках ложной коррекции происходить не должно. С этой целью сигнал ошибки ε в отличие от сигнала в структуре на рис. 1, а не инвертируется.

Отметим две особенности отказоустойчивых структур, основанных на дублировании. Первая особенность: при реализации СВК может быть подобран такой способ самодвойственного дополнения, который позволит выбрать минимальный по показателям сложности блок $\Delta(x)$. Это следует из многообразия способов получения самодвойственных функций: для n аргументов существует $2^{2^{n-1}}$ самодвойственных функций (например, для устройства с $m = 4$ выходами существует $2^{2^{(4+1)-1}} = 2^{16} = 65\,536$ способов получения

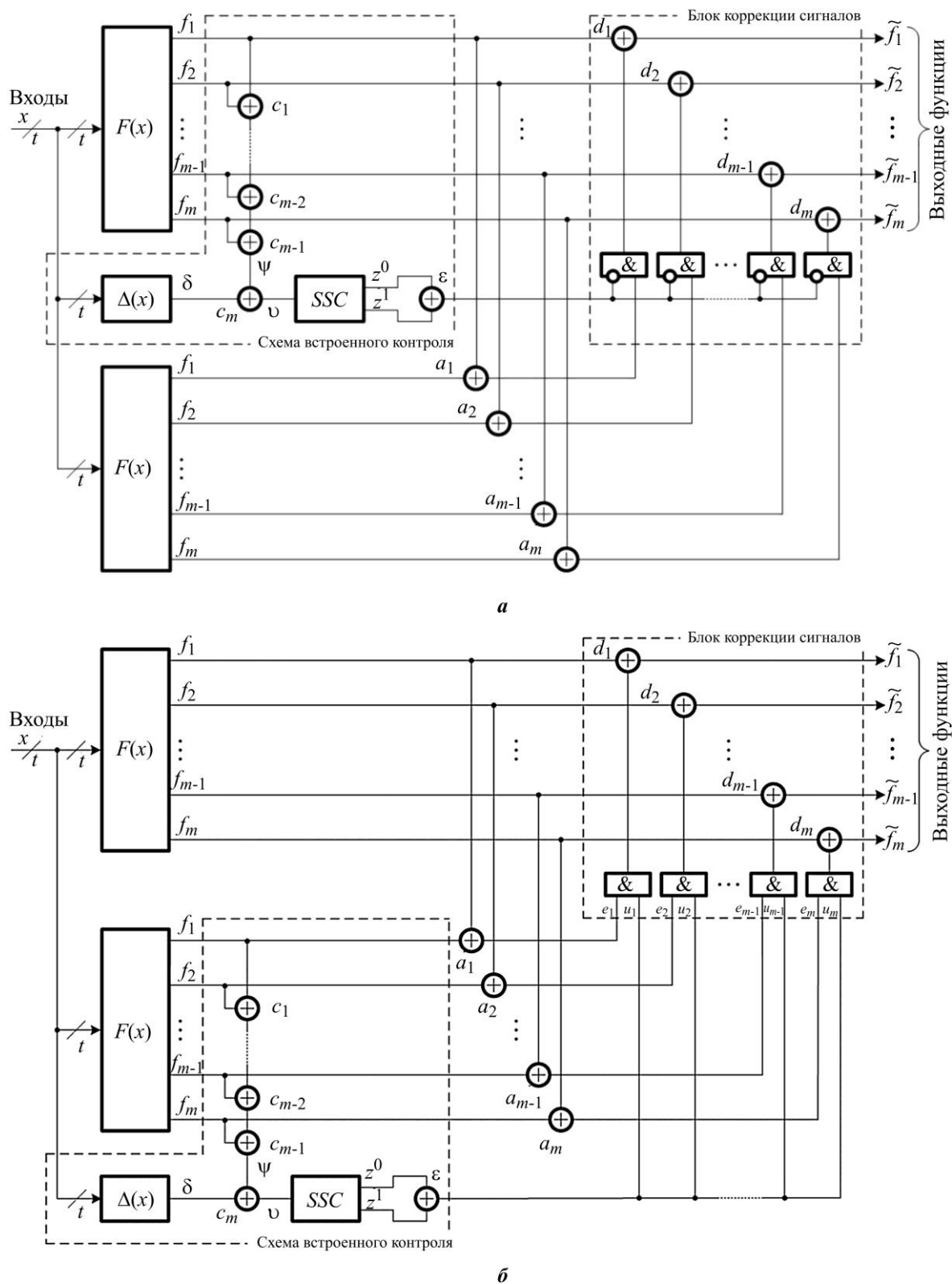


Рис. 1. Самодвойственная отказоустойчивая структура на основе дублирования с контролем вычислений по паритету основным блоком (а) и дополнительным блоком (б)
 Fig. 1. Self-dual fault-tolerant structure based on duplication with calculations checking by parity code by a basic block (a) and an additional block (b)

самодвойственной функции ν с использованием функции δ). Значения функции δ могут быть получены эвристически путем ее доопределения либо с использованием функционального подхода. Некоторые способы самодвойственных преобразований приведены в работе [26]. Вторая особенность: ложная коррекция или ее отсутствие возможны в том случае, если СВК не зафиксирует ошибку или откажет какой-либо из элементов блока коррекции сигналов. Поэтому требуется анализ множества допустимых ошибок на выходах устройства при внесении в него полного множества неисправностей из заданного класса, а также высоконадежная реализация блока коррекции сигналов. В случае использования кода паритета для сжатия сигналов требуется исключить все ошибки с четными кратностями. Это возможно путем выделения групп независимых выходов либо путем изначальной реализации блока $F(x)$ в виде устройства, имеющего единую группу независимых выходов [3]. Альтернатива этим способам – применение вместо кодов паритета кодов с более высокой обнаруживающей способностью [27, 28].

Структуры устройств оцениваются различными показателями сложности реализации. Это может быть условный показатель (характеризующий сложность без привязки к конкретной технологии реализации, например число литер в формульной записи или число входов используемых логических элементов) либо абсолютный показатель (характеризующий сложность в конкретных измерительных единицах, например в числе транзисторов на кристалле, использованных при построении устройства).

Показатель сложности технической реализации обозначим через L_a^b (усл. ед.), нижний индекс a указывает на конкретный функциональный блок в составе устройства, верхний индекс b – на принадлежность к какой-либо структуре. Для некоторых функциональных блоков вне зависимости от структуры показатель сложности постоянный. В этом случае верхний индекс не указываем.

Запишем выражение, определяющее показатель сложности широко распространенной структуры с тройной модульной избыточностью и с применением мажоритарных элементов для коррекции (TMR-система (Triple-Modular Redundancy System)):

$$L_{TMR} = 3L_{F(x)} + mL_{MAJ}, \quad (1)$$

где $L_{F(x)}$ – показатель сложности реализации блока $F(x)$; L_{MAJ} – показатель сложности реализации мажоритарного элемента.

Можно считать, что показатель L_{TMR} – верхняя оценка сложности реализации отказоустойчивого устройства, с которой целесообразно сравнивать показатели сложности устройств для иных отказоустойчивых структур. Кроме того, заметим, что структура с тройной модульной избыточностью с мажоритарной коррекцией ошибок может, так же как и все рассмотренные далее, функционировать в импульсном режиме, так как мажоритарный элемент является самодвойственным устройством.

Выражение для оценки сложности структуры на основе дублирования (DMR-система (Double-Modular Redundancy System)) с контролем вычислений по паритету основным блоком записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} L_{DMR}^N &= 2L_{F(x)} + L_{CED}^{DMRN} + L_{SCB} + mL_{XOR} = \\ &= 2L_{F(x)} + \left(L_{\Delta(x)}^{DMRN} + mL_{XOR} + L_{SSC} + L_{XOR} \right) + \left(mL_{2AND} + mL_{XOR} \right) + mL_{XOR} = \\ &= 2L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} + mL_{2AND}, \end{aligned} \quad (2)$$

где N в верхнем индексе указывает на конкретную структуру ($N \in \{P, A\}$, P (primary) указывает на то, что контролируются вычисления на выходах основного блока, A (additional) – дополнительного); L_{CED}^{DMRN} – показатель сложности СВК; L_{SCB} – показатель сложности блока коррекции сигналов; L_{XOR} – показатель сложности элемента XOR ; $L_{\Delta(x)}^{DMRN}$ – показатель сложности блока самодвойственного дополнения в СВК; L_{SSC} – показатель сложности тестера самодвойственности; L_{2AND} – показатель сложности элемента AND с двумя входами (отметим, что не учитываются инверсии на входах этих элементов).

Учитывая, что в структурах, приведенных на рис. 1, использованы по две копии исходного устройства $F(x)$, можно записать $L_{\Delta(x)}^{DMRP} = L_{\Delta(x)}^{DMRA}$, а значит, структуры отказоустойчивых устройств на основе дублирования с контролем вычислений по паритету имеют одинаковые показатели сложности. Разными они будут только в том случае, если при реализации копии $F(x)$ используется диверсная защита аппаратных средств: на выходах выполняются те же функции, что и исходным устройством, но с использованием другой технологии (другая элементная база, другие функции и пр.). Далее эта разница не учитывается.

Самодвойственная отказоустойчивая структура на основе дублирования с контролем вычислений по паритету эффективнее структуры с тройной модульной избыточностью по показателю сложности реализации в том случае, если разница между величинами L_{TMR} и L_{DMR}^N положительная. Запишем разницу между выражениями (2) и (1):

$$\begin{aligned} \Delta L_{DMR/TMR}^N &= L_{TMR} - L_{DMR}^N = \left(3L_{F(x)} + mL_{MAJ} \right) - \\ &- \left(2L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &= \left(L_{F(x)} + mL_{MAJ} \right) - \left(L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Мажоритарный элемент имеет типовую реализацию на трех двухвходовых элементах AND и одном трехвходовом элементе OR (здесь речь не идет об особых технологиях реализации высоконадежных мажоритарных элементов). Для него $L_{MAJ} = L_{2AND} + L_{3OR}$. С учетом этого выражение (3) принимает вид

$$\begin{aligned} \Delta L_{DMR/TMR}^N &= \left(L_{F(x)} + m(L_{2AND} + L_{3OR}) \right) - \left(L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &= L_{F(x)} + mL_{3OR} - \left(L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} \right). \end{aligned}$$

Откуда следует, что $\Delta L_{DMR/TMR}^N > 0$ при

$$L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} - mL_{3OR} < L_{F(x)}. \quad (4)$$

Выражение (4) используется для оценки эффективности разрабатываемой отказоустойчивой структуры на основе дублирования с контролем вычислений.

Самодвойственные отказоустойчивые структуры на основе метода логической коррекции сигналов с контролем вычислений по паритету. Отказоустойчивое устройство может быть выполнено и без использования принципов внесения модульной избыточности [11]. В этом случае эффективным оказывается метод логической коррек-

ции сигналов (ЛКС), или метод логического дополнения, описанный в [29]. Суть метода состоит в том, что для контроля вычислений можно использовать предварительное преобразование функций, вычисляемых на выходах исходного устройства. В отказоустойчивых структурах метод ЛКС используется при реализации блока фиксации искаженных сигналов.

На рис. 2, а приведена самодвойственная отказоустойчивая структура, полученная из структуры, представленной на рис. 1, а. СВК в этой структуре контролирует вычисления на выходах устройства $F(x)$, а копия этого устройства заменена блоком фиксации искаженных сигналов. Блок фиксации искаженных сигналов включает в себя устройства $G(x)$, $R(x)$ и два каскада элементов XOR a_i и b_i , $i = \overline{1, m}$. Элементы a_i , так же как и в структурах на рис. 1, использованы для выявления ошибочных сигналов. Элементы b_i предназначены для коррекции ошибок. Сигналы для выбора корректируемых функций вырабатываются блоком $R(x)$: при $r_i = 1$, $i = \overline{1, m}$, корректируется сигнал i -й функции, поступающей с выходов элементов a_i . Функции коррекции r_i , $i = \overline{1, m}$, определяются на этапе проектирования отказоустойчивого устройства и могут быть произвольными. Например, особый случай – это выбор в качестве функций коррекции входных переменных x_i , $i = \overline{1, t}$ [11]. Такой способ не требует физической реализации блока $R(x)$: он является вырожденным и представляет собой коммутатор проводов. Функции коррекции r_i , $i = \overline{1, m}$, подбираются таким образом, чтобы на выходе блока фиксации искаженных сигналов определялись функции ошибки $e_i = f_i \oplus g_i \oplus r_i = 0$, $i = \overline{1, m}$. Установив выражения для функций r_i при синтезе блока фиксации искаженных сигналов, переходят к определению функций на выходах дополнительного блока $G(x)$, применяя условие $g_i = f_i \oplus r_i$, $i = \overline{1, m}$ [11]. Таким образом, на этапе проектирования отказоустойчивого устройства можно выбрать такой способ реализации блоков $G(x)$ и $R(x)$, который будет давать минимальную по показателям сложности структуру блока фиксации искаженных сигналов.

На рис. 2, б схематически изображена отказоустойчивая структура на основе метода ЛКС с контролем вычислений по паритету дополнительным блоком. Фактически она получается из структуры, приведенной на рис. 1, б, в которой контролируется копия исходного устройства. Принципы реализации блока фиксации искаженных сигналов те же, что и для структуры, приведенной на рис. 2, а.

Оценим сложность реализации самодвойственных отказоустойчивых структур на основе метода ЛКС (ВС-система (Boolean Complement System)):

$$\begin{aligned} L_{BC}^N &= L_{F(x)} + L_{CED}^{BCN} + L_{SCB} + L_{FDSB}^{BCN} = \\ &= L_{F(x)} + \left(L_{\Delta(x)}^{BCN} + mL_{XOR} + L_{SSC} + L_{XOR} \right) + \left(mL_{AND} + mL_{XOR} \right) + \left(L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + 2mL_{XOR} \right) = \quad (5) \\ &= L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} + mL_{2AND}, \end{aligned}$$

где L_{CED}^{BCN} – показатель сложности СВК; L_{FDSB}^{BCN} – показатель сложности блока фиксации искаженных сигналов, за исключением показателя сложности СВК во второй структуре на основе метода ЛКС; $L_{\Delta(x)}^{BCN}$, $L_{G(x)}^{BCN}$, $L_{R(x)}^{BCN}$ – сложность блоков $\Delta(x)$, $G(x)$ и $R(x)$ соответственно.

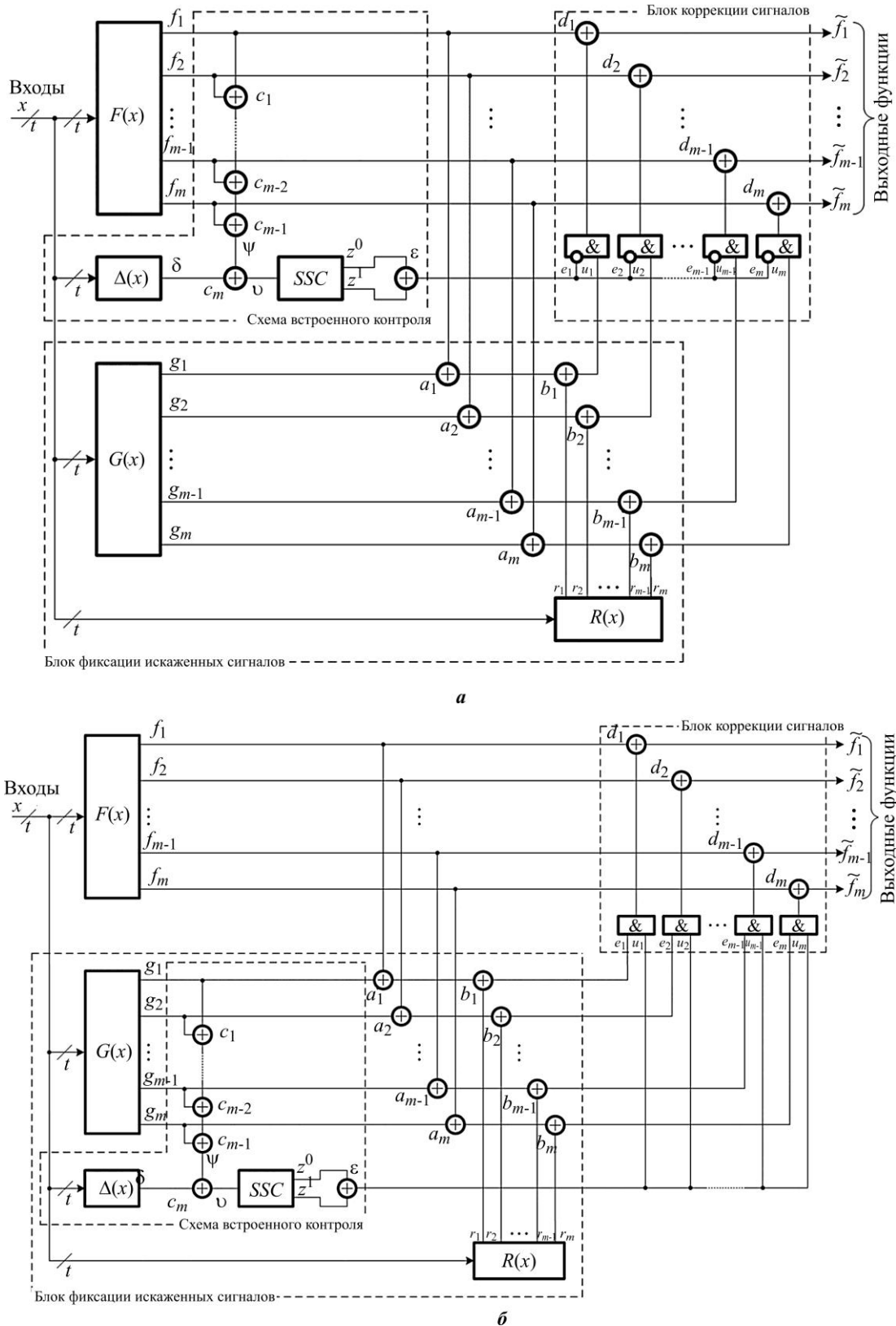


Рис. 2. Самодвойственная отказоустойчивая структура на основе метода ЛКС с контролем вычислений по паритету основным блоком (а) и дополнительным блоком (б)

Fig. 2. A self-dual fault-tolerant structure implemented by the Boolean signals correction method with calculations checking by parity code by a basic block (a) and an additional block (b)

Разница между двумя отказоустойчивыми структурами, синтезируемыми на основе метода ЛКС, – в способе реализации блока фиксации искаженных сигналов. Схемы блоков $\Delta(x)$, $G(x)$ и $R(x)$ в обеих структурах могут быть разными, что определяется изначальным способом формирования функций коррекции в блоке $R(x)$. Запишем разницу между итоговыми показателями сложности структуры на рис. 2, б и структуры на рис. 2, а:

$$\begin{aligned}\Delta L_{BC}^N &= L_{BC}^P - L_{BC}^A = \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BCP} + L_{G(x)}^{BCP} + L_{R(x)}^{BCP} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) - \\ &\quad - \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BCA} + L_{G(x)}^{BCA} + L_{R(x)}^{BCA} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &\quad = L_{\Delta(x)}^{BCP} + L_{G(x)}^{BCP} + L_{R(x)}^{BCP} - \left(L_{\Delta(x)}^{BCA} + L_{G(x)}^{BCA} + L_{R(x)}^{BCA} \right).\end{aligned}$$

Вторая отказоустойчивая структура на основе метода ЛКС эффективнее первой, если $\Delta L_{BC}^N > 0$:

$$L_{\Delta(x)}^{BCP} + L_{G(x)}^{BCP} + L_{R(x)}^{BCP} > L_{\Delta(x)}^{BCA} + L_{G(x)}^{BCA} + L_{R(x)}^{BCA}. \quad (6)$$

Проверка условия (6) позволяет выявить наиболее эффективный способ реализации отказоустойчивой структуры с применением метода ЛКС. Структуры самодвойственных отказоустойчивых устройств на основе метода ЛКС целесообразно сравнивать со структурами, в которых используется принцип модульной избыточности. Для сравнения структур на основе метода ЛКС со структурами, использующими идею дублирования, запишем разницу между выражениями (2) и (5):

$$\begin{aligned}\Delta L_{BC/DMR}^N &= L_{DMR}^N - L_{BC}^N = \left(2L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) - \\ &\quad - \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &\quad = L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{DMRN} - \left(L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + mL_{XOR} \right).\end{aligned}$$

Структуры на основе метода ЛКС эффективнее по показателям сложности реализации по сравнению с применением дублирования при $\Delta L_{BC/DMR}^N > 0$:

$$L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + mL_{XOR} - L_{\Delta(x)}^{DMRN} < L_{F(x)}.$$

Для сравнения с троированием запишем разницу между выражениями (1) и (5) с учетом выражения для оценки показателя сложности реализации мажоритарного элемента:

$$\begin{aligned}\Delta L_{BC/TMR}^N &= \left(3L_{F(x)} + m(L_{2AND} + L_{3OR}) \right) - \\ &\quad - \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &\quad = 2L_{F(x)} + mL_{3OR} - \left(L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} \right).\end{aligned}$$

Величина $\Delta L_{BC/TMR}^N > 0$ при

$$L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} - mL_{3OR} < 2L_{F(x)}.$$

Если при реализации блока $R(x)$ для коррекции используются не входные переменные, а некоторые функции, то при реализации блока фиксации искаженных сигналов требуется также контролировать в СВК вычисления на выходах $R(x)$. На рис. 3 приведена обобщенная самодвойственная отказоустойчивая структура, в которой контролируются вычисления на выходах обоих блоков $G(x)$ и $R(x)$ в блоке фиксации искаженных сигналов.

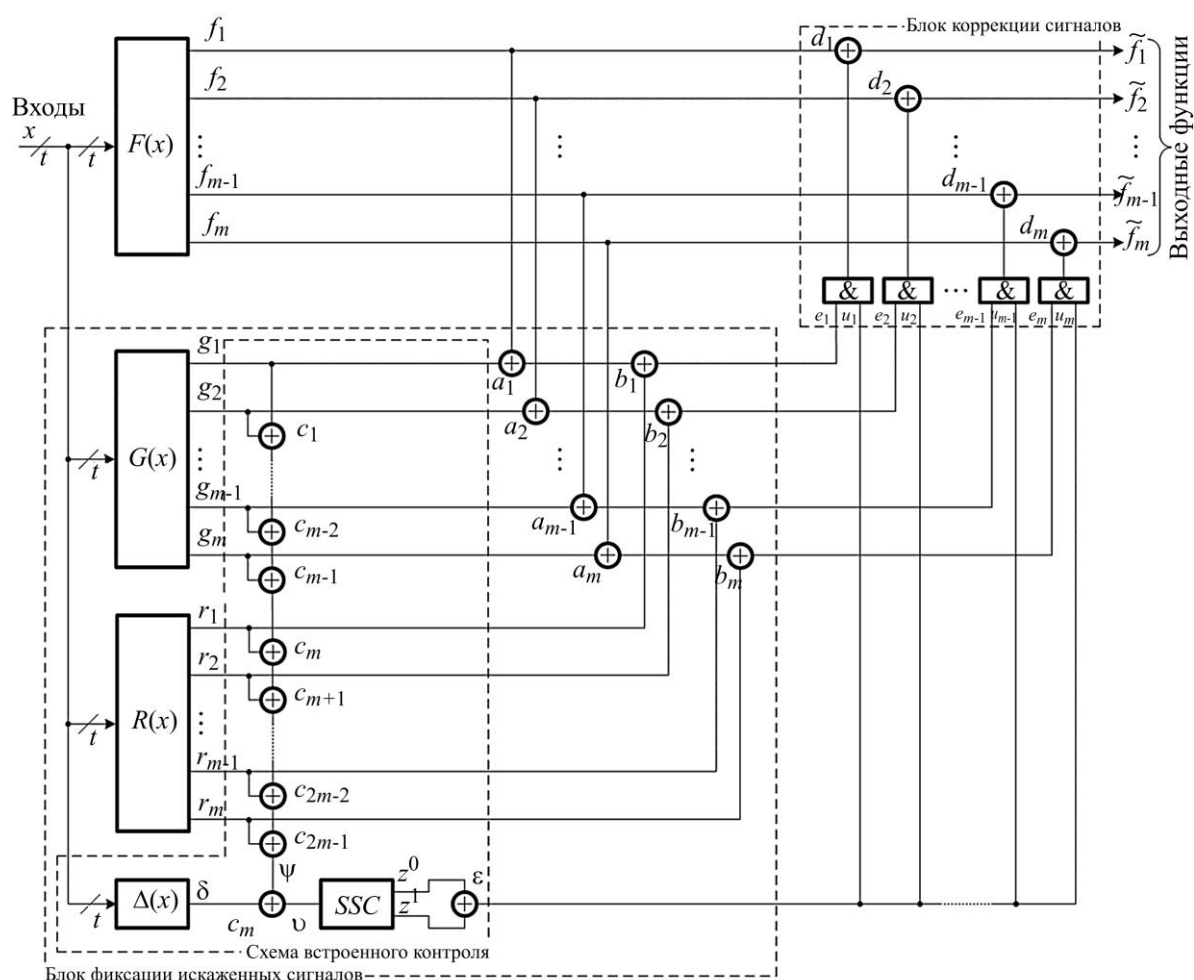


Рис. 3. Обобщенная самодвойственная отказоустойчивая структура на основе метода ЛКС с контролем вычислений по паритету блоками дополнения и формирования функций коррекции

Fig. 3. Generalized self-dual fault-tolerant structure implemented by the Boolean signals correction method with calculations checking by parity by an additional block and formation of correction functions

Показатель сложности обобщенной самодвойственной отказоустойчивой структуры определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 L_{BC}^{GEN} &= L_{F(x)} + L_{CED}^{BCN} + L_{SCB} + L_{FDSB}^{BCN} = L_{F(x)} + \left(L_{\Delta(x)}^{GEN} + (2m-1)L_{XOR} + L_{SSC} + L_{XOR} \right) + \\
 &\quad + (mL_{2AND} + mL_{XOR}) + \left(L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + 2mL_{XOR} \right) = \\
 &= L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + L_{SSC} + 5mL_{XOR} + mL_{2AND}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Вычитая из выражения (5) выражение (7), получаем

$$\begin{aligned}\Delta L_{BC}^{N/GEN} &= L_{BC}^N - L_{BC}^{GEN} = \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} + L_{SSC} + (4m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) - \\ &\quad - \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + L_{SSC} + 5mL_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &= L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} - \left(L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + (m-1)L_{XOR} \right).\end{aligned}$$

Величина $\Delta L_{BC}^{N/GEN} > 0$, если

$$L_{\Delta(x)}^{BCN} + L_{G(x)}^{BCN} + L_{R(x)}^{BCN} > L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + (m-1)L_{XOR}.$$

Сравнивая обобщенную структуру со структурами на основе дублирования, вычитаем из выражения (7) выражение (2):

$$\begin{aligned}\Delta L_{BC/DMR}^{GEN} &= L_{DMR}^N - L_{BC}^{GEN} = \left(2L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3m+1)L_{XOR} + mL_{2AND} \right) - \\ &\quad - \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + L_{SSC} + 5mL_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &= L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{DMRN} - \left(L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + (2m-1)L_{XOR} \right).\end{aligned}$$

Обобщенная структура эффективнее при $\Delta L_{BC/DMR}^{GEN} > 0$:

$$L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + (2m-1)L_{XOR} - L_{\Delta(x)}^{DMRN} < L_{F(x)}.$$

Сравнивая обобщенную структуру с системой на основе троирования, запишем разницу между выражениями (7) и (1):

$$\begin{aligned}\Delta L_{BC/TMR}^{GEN} &= L_{TMR} - L_{BC}^{GEN} = \left(3L_{F(x)} + m(L_{2AND} + L_{3OR}) \right) - \\ &\quad - \left(L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + L_{SSC} + 5mL_{XOR} + mL_{2AND} \right) = \\ &= 2L_{F(x)} + mL_{3OR} - \left(L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + L_{SSC} + 5mL_{XOR} \right).\end{aligned}$$

Обобщенная структура эффективнее при $\Delta L_{BC/TMR}^{GEN} > 0$:

$$L_{\Delta(x)}^{GEN} + L_{G(x)}^{GEN} + L_{R(x)}^{GEN} + L_{SSC} + 5mL_{XOR} - mL_{3OR} < 2L_{F(x)}.$$

Заключение. Самодвойственные отказоустойчивые устройства, синтезированные по приведенным структурам, могут использоваться при построении надежных цифровых устройств. Применение кодов паритета в них при создании СВК эффективно в том случае, если предварительно выделены группы независимых выходов среди множества выходов устройства. Более эффективно применение иных помехозащищенных кодов, в том числе кодов, для которых на этапе построения установлено требуемое минимальное кодовое расстояние для покрытия любых ошибок. Такими кодами могут быть, например, коды Рида – Маллера [30]. При этом, так как схемы функционируют в импульсном режиме, необходимо выполнение следующего условия: ошибки не должны вызывать искажений одновременно в обеих комбинациях в каждой подаваемой на входы устройства паре.

Отметим также, что в представленных структурах блоки коррекции сигналов являются теми элементами, которые непосредственно отвечают за коррекцию значений функций f_1, f_2, \dots, f_m , и отказы их элементов гарантированно приведут к ошибкам в коррекции. По этой причине они должны быть реализованы в виде высоконадежных устройств с применением соответствующих подходов к их проектированию [4].

Дальнейшие исследования будут посвящены изучению обнаруживающих и корректирующих способностей отказоустойчивых структур в условиях отказов их компонентов. Исследование эффективности представленных решений, в том числе влияние на вероятность пропуска ошибки, также возможное направление дальнейших работ.

Реализация самодвойственных отказоустойчивых устройств – до конца не исследованная область теории дискретных устройств, которая может найти широкое применение в практике синтеза надежных цифровых систем.

Литература

1. Checkability of the digital components in safety-critical systems: Problems and solutions / **A. Drozd, V. Kharchenko, S. Antoshchuk et al.** // 2011 9th East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Sevastopol: IEEE, 2011. P. 411–416. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2011.6116606>
2. Hidden fault analysis of FPGA projects for critical applications / **O. Drozd, I. Perebeinos, O. Martynyuk et al.** // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). Lviv-Slavske: IEEE, 2020. P. 467–471. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235591>
3. **Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 207 с.
4. **Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.** Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автомат. и телемех. 1994. № 8. С. 3–50. EDN: YZNRGT.
5. **Скляр В. В., Харченко В. С.** Отказоустойчивые компьютерные системы управления с версионно-пороговой адаптацией: Способы адаптации, оценка надежности, выбор архитектур // Автомат. и телемех. 2002. № 6. С. 131–145. EDN: NUGISJ.
6. Design and test technology for dependable systems-on-chip / eds **R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus.** Hershey; New York: Information Science Reference, 2010. 580 p. (Premier Reference Sources).
7. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем = On-line testing of the safe instrumentation and control systems / **А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук и др.**; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. 614 с.
8. **Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 312 с.
9. **Федоров Ю. Н.** Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. М.: Инфра-Инженерия, 2008. 926 с.
10. Railway signalling and interlocking: International compendium / eds **G. Theeg, S. Vlasenko.** 3rd ed. Leverkusen: PMC Media House, 2020. 552 p.
11. **Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.** Отказоустойчивые структуры цифровых устройств на основе логического дополнения // Автомат. и телемех. 2021. № 8. С. 140–158. <https://doi.org/10.31857/S0005231021080079>. – EDN: TUUDZK.
12. **Reynolds D. A., Metze G.** Fault detection capabilities of alternating logic // IEEE Trans. Comput. 1978. Vol. C-27. Iss. 12. P. 1093–1098. <https://doi.org/10.1109/TC.1978.1675011>
13. **Ефанов Д. В., Погодина Т. С.** Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 2. С. 349–392. <https://doi.org/10.15622/ia.22.2.5>. – EDN: FGQINF.
14. **Сапожников Вл. В.** Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов. М.: Наука, 2021. 229 с.
15. **Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Гессель М.** Самодвойственные дискретные устройства. СПб.: Энергоатомиздат. С.-Петерб. отд-ние, 2001. 330 с.

16. Гессель М., Мошанин В. И., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Обнаружение неисправностей в самопроверяемых комбинационных схемах с использованием свойств самодвойственных функций // Автомат. и телемех. 1997. № 12. С. 193–200. EDN: YZRWPL.
17. Аксёнова Г. П. Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных // Автомат. и телемех. 1987. № 10. С. 144–153.
18. Гессель М., Дмитриев А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Исследование свойств самодвойственных самопроверяемых многотактных схем // Автомат. и телемех. 2001. № 4. С. 148–159. EDN: ODWNLL.
19. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Валиев Р. Ш. О синтезе самодвойственных логических схем с памятью // Электронное моделирование. 2004. Т. 26. № 2. С. 39–56.
20. Otscheretnij V., Goessel M., Saposhnikov Vl. V., Saposhnikov V. V. Fault-tolerant self-dual circuits with error detection by parity- and group parity prediction // Proc. 4th IEEE International On-Line Testing Workshop. Capri: IEEE, 1998. P. 124–130.
21. Saposhnikov Vl., Otscheretnij V., Saposhnikov V., Gössel M. Design of fault-tolerant circuits by self-dual duplication // Proc. 2nd International Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems. Szczyrk: DDECS, 1998. P. 129–136.
22. Matsumoto K., Uehara M., Mori H. Evaluating the fault tolerance of stateful TMR // 2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems. Takayama: IEEE, 2010. P. 332–336. <https://doi.org/10.1109/NBiS.2010.86>
23. Borecký J., Kohlík M., Vít P., Kubátová H. Enhanced duplication method with TMR-like masking abilities // 2016 Euromicro Conference on Digital System Design (DSD). Limassol: IEEE, 2016. P. 690–693. <https://doi.org/10.1109/DSD.2016.91>
24. Saposhnikov Vl. V., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V. V. Self-dual parity checking – A new method for on-line testing // Proceedings of 14th VLSI Test Symposium. Princeton, NJ: IEEE, 1996. P. 162–168. <https://doi.org/10.1109/VTEST.1996.510852>
25. Ефанов Д. В., Погодина Т. С. Самодвойственный контроль комбинационных схем с применением кодов Хэмминга // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2022. № 3. С. 113–122. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2022-3-113-122>. – EDN: VCEWAT.
26. Гессель М., Дмитриев А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Самотестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах // Автомат. и телемех. 1999. № 11. С. 162–174. EDN: OKENAD.
27. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. М.: Наука, 2020. 382 с.
28. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. М.: Наука, 2021. 453 с.
29. Гессель М., Морозов А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем // Автомат. и телемех. 2003. № 1. С. 167–176. EDN: NTGMJP.
30. Соловьева Ф. И. О построении кодов типа Рида – Маллера и исследовании их свойств // Тр. МФТИ. 2022. Т. 14. № 2 (54). С. 110–123. EDN: YGVLWY.

Статья поступила в редакцию 27.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.05.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Ефанов Дмитрий Викторович – доктор технических наук, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29), профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9), TrES-4b@yandex.ru

Погодина Татьяна Сергеевна – студентка Российского университета транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9), pogodina-ts@mail.ru

References

1. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J., Drozd M. Checkability of the digital components in safety-critical systems: Problems and solutions. *2011 9th East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Sevastopol, IEEE, 2011, pp. 411–416. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2011.6116606>
2. Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkina K., Ivanova O., Drozd M. Hidden fault analysis of FPGA projects for critical applications. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, IEEE, 2020, pp. 467–471. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235591>
3. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Self-checking devices and fault-tolerant systems*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 207 p. (In Russian).
4. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Methods for providing safety in discrete systems. *Avtomat. i telemekh. = Autom. Remote Control*, 1994, no. 8, pp. 3–50. (In Russian). EDN: YZNRGT.
5. Sklyar V. V., Kharchenko V. S. Fault-tolerant computer-aided control systems with multiversion-threshold adaptation: Adaptation methods, reliability estimation, and choice of an architecture. *Autom. Remote Control*, 2002, vol. 63, iss. 6, pp. 991–1003. <https://doi.org/10.1023/A:1016130108770>
6. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T., eds. *Design and test technology for dependable systems-on-chip*. Hershey, New York, Information Science Reference, 2010. 580 p. Premier Reference Sources.
7. Drozd A. V. (auth., ed.), Kharchenko V. S. (auth., ed.), Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A., Sulima Yu. Yu. *On-line testing of the safe instrumentation and control systems*. Kharkiv, National Aerospace Univ. n. a. N. E. Zhukovsky "KhAI", 2012. 614 p. (In Russian).
8. Mikoni S. V., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Qualimetry of models and polymodel complexes*. Moscow, RAS Publ., 2018. 312 p. (In Russian).
9. Fedorov Yu. N. *APCS engineering handbook: design and development*. Moscow, Infra-Ingenieriya Publ., 2008. 926 p. (In Russian).
10. Theeg G., Vlasenko S., eds. *Railway signalling and interlocking: International compendium*. 3rd ed. Leverkusen, PMC Media House, 2020. 552 p.
11. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Boolean-complement based fault-tolerant electronic device architectures. *Autom. Remote Control*, 2021, vol. 82, iss. 8, pp. 1403–1417. <https://doi.org/10.1134/S0005117921080075>
12. Reynolds D. A., Metze G. Fault detection capabilities of alternating logic. *IEEE Trans. Comput.*, 1978, vol. C-27, iss. 12, pp. 1093–1098. <https://doi.org/10.1109/TC.1978.1675011>
13. Efanov D., Pogodina T. Properties investigation of self-dual combinational devices with calculation control based on Hamming codes. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2023, vol. 22, no. 2, pp. 349–392. (In Russian). <https://doi.org/10.15622/ia.22.2.5>. – EDN: FGQINF.
14. Sapozhnikov V. V. *Synthesis of train control systems at railway stations with exclusion of dangerous failures*. Moscow, Nauka Publ., 2021. 229 p. (In Russian).
15. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Goessel M. *Self-dual discrete devices*. St. Petersburg, Energoatomizdat. S.-Peterb. otd.-nie Publ., 2001. 330 p. (In Russian).
16. Goessel M., Moshanin V. I., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Fault detection in self-test combination circuits using the properties of self-dual functions. *Avtomat. i telemekh. = Autom. Remote Control*, 1997, no. 12, pp. 193–200. (In Russian). EDN: YZRWPL.
17. Aksjonova G. P. Restoration in duplicated units by the method of data inversion. *Avtomat. i telemekh. = Autom. Remote Control*, 1987, no. 10, pp. 144–153. (In Russian).
18. Goessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Self-dual self-testing multicycle circuits: Their properties. *Autom. and Remote Control*, 2001, vol. 62, iss. 4, pp. 642–652. <https://doi.org/10.1023/A:1010245914985>
19. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Valiev R. Sh. On the synthesis of self-dual logic circuits with memory. *Elektronnoe modelirovanie = Engineering Modelling*, 2004, vol. 26, no. 2, pp. 39–56. (In Russian).
20. Otscheretnij V., Goessel M., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Fault-tolerant self-dual circuits with error detection by parity- and group parity prediction. *Proc. 4th IEEE International On-Line Testing Workshop*. Capri, IEEE, 1998, pp. 124–130.
21. Sapozhnikov V., Otscheretnij V., Sapozhnikov V., Goessel M. Design of fault-tolerant circuits by self-dual duplication. *Proc. 2nd International Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems*. Szczyrk, DDECS, 1998, pp. 129–136.

22. Matsumoto K., Uehara M., Mori H. Evaluating the fault tolerance of stateful TMR. *2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems*. Takayama, IEEE, 2010, pp. 332–336. <https://doi.org/10.1109/NBiS.2010.86>
23. Borecký J., Kohlík M., Vít P., Kubátová H. Enhanced duplication method with TMR-like masking abilities. *2016 Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*. Limassol, IEEE, 2016, pp. 690–693. <https://doi.org/10.1109/DSD.2016.91>
24. Sapozhnikov V. V., Dmitriev A., Goessel M., Sapozhnikov V. V. Self-dual parity checking – A new method for on-line testing. *Proceedings of 14th VLSI Test Symposium*. Princeton, NJ, IEEE, 1996, pp. 162–168. <https://doi.org/10.1109/VTEST.1996.510852>
25. Efanov D. V., Pogodina T. S. Self-dual control of combinational circuits with using Hamming codes. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2022, no. 3, pp. 113–122. (In Russian). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2022-3-113-122>. – EDN: VCEWAT.
26. Gessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. A self-testable structure for functional fault detection in combination circuits. *Avtomat. i telemekh. = Autom. Remote Control*, 1999, no. 11, pp. 162–174. (In Russian). EDN: OKENAD.
27. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Sum codes for technical diagnostics systems, vol. 1: Classical Berger codes and their modifications*. Moscow, Nauka Publ., 2020. 382 p. (In Russian).
28. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Sum codes for technical diagnostics systems, vol. 2: Weight-based sum codes*. Moscow, Nauka Publ., 2021. 453 p. (In Russian).
29. Gessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Logic complement, a new method of checking the combinational circuits. *Autom. Remote Control*, 2003, vol. 64, iss. 1, pp. 153–161. <https://doi.org/10.1023/A:1021884727370>
30. Soloveva F. I. On constructions of Reed – Muller like codes and investigation of their properties. *Tr. MFTI = Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, 2022, vol. 14, no. 2 (54), pp. 110–123. (In Russian). EDN: YGVLWY.

The article was submitted 27.03.2023; approved after reviewing 29.05.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Dmitry V. Efanov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Higher School of Transport of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29), Prof. of the Automation, Remote Control and Communications on Railway Transport Department, Russian University of Transport (Russia, 127994, Moscow, Obraztsov st., 9, bld.9), TrES-4b@yandex.ru

Tatiana S. Pogodina – Student of the Russian University of Transport (Russia, 127994, Moscow, Obraztsov st., 9, bld.9), pogodina-ts@mail.ru

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 – 2022 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>

Метод автоматизированного тестирования устройств потребительской электроники с помощью удаленного вызова процедур и облачных сервисов

Л. Г. Гагарина, А. В. Букарев

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

anton@bukarev.org

Аннотация. В настоящее время, согласно данным аналитических агентств TAdviser и Statista, при автоматизированном производстве потребительской электроники количество ошибок ежегодно увеличивается на 24 %, что представляет собой актуальную проблему. Существующие методы и средства организации процесса тестирования программного обеспечения при автоматизированном производстве потребительской электроники недостаточно эффективны. Несмотря на то что облачные технологии улучшают процесс разработки программного обеспечения, технические аспекты тестирования еще не полностью изучены. В работе представлен метод дистанционного автоматизированного тестирования программного обеспечения устройств потребительской электроники с использованием удаленного вызова процедур Remote Procedure Call (RPC) с целью улучшить процесс, сэкономить ресурсы и увеличить масштабируемость. Исследование охватывает анализ существующих архитектурных решений, разработку модели процесса тестирования с помощью теории массового обслуживания и метода Монте-Карло. В рамках практического эксперимента создан и применен диспетчер задач, эффективно регулирующий процесс тестирования программного обеспечения устройств потребительской электроники в облачном сервисе, что позволило интегрировать существующие методы тестирования без необходимости модификации их конструкции. Такой подход способствует оптимизации процесса, уменьшению временных затрат и подтверждает успешное применение предложенного метода.

Ключевые слова: автоматизированное тестирование программного обеспечения, диспетчер задач, облачные устройства, модульное тестирование

Для цитирования: Гагарина Л. Г., Букарев А. В. Метод автоматизированного тестирования устройств потребительской электроники с помощью удаленного вызова процедур и облачных сервисов // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 687–699. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-687-699>. – EDN: XVMGMA.

A method for automated testing of consumer electronics devices using remote procedure calls and cloud services

L. G. Gagarina, A. V. Bukarev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

anton@bukarev.org

Abstract. In recent times, according to data from TAdviser and Statista think tanks, there is a pressing issue of a 24 % annual increase in errors in automated electronics production. Existing methods and tools for software testing organization at automated production of consumer electronics fail to achieve optimum effect. Despite cloud technologies enhancing the software development process, the technical aspects of testing are not yet fully explored. In this work, a method of remote automated testing for software of consumer electronics devices using Remote Procedure Call (RPC) is presented, aimed at improving the process, conserving resources, and increasing scalability. The study covers the analysis of existing architectural solutions and the development of a testing process model using queueing theory and the Monte Carlo method. Within the practical experiment, a task dispatcher has been designed and applied, efficiently regulating the software testing process for consumer electronics devices in a cloud service, which has allowed for the integration of existing testing methods without needing to modify their structure. This approach contributes to process optimization, reduces time expenses, and confirms the successful application of the proposed method.

Keywords: automated software testing, task dispatcher, cloud devices, mobile devices, unit testing

For citation: Gagarina L. G., Bukarev A. V. A method for automated testing of consumer electronics devices using remote procedure calls and cloud services. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 687–699. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-687-699>. – EDN: XVMGMA.

Введение. По оценкам аналитических агентств TAdviser и Statista, на потребительскую электронику (ПЭ) в мире, включая такие категории, как телевизоры, ТВ-приставки, домашние аудиосистемы, Bluetooth-колонки, игровые консоли, цифровые камеры, видеокамеры, дроны, автомобильные мультимедиа и пр., в 2022 г. было потрачено 2,2 трлн евро. В 2023 г. спрос на новые модели данной электроники сохраняется [1, 2]. Однако существующие в настоящее время методы и средства организации процесса тестирования программного обеспечения (ПО) при автоматизированном производстве ПЭ недостаточно эффективны, что, по оценкам аналитических агентств, приводит ежегодно к росту обнаружения программных ошибок на этапе эксплуатации ПО в среднем на 24 %.

Известно, что жизненный цикл разработки ПО эффективнее при применении облачных технологий и сервисов, которые выполняют ряд функций, направленных на анализ процесса тестирования как архитектурного атрибута. Такой подход позволяет гарантировать более глубокое и детальное тестирование. Следует отметить, что прово-

димые исследования в этой области посвящены использованию подхода высокоуровневого проектирования архитектуры ПО, технические аспекты процессов тестирования оставлены без внимания [3, 4]. Таким образом, задача эффективной организации распределенного тестирования ПО с применением облачных сервисов и разработки специализированных моделей, методов и алгоритмов актуальна.

В настоящей работе на основе анализа существующих архитектурных решений разрабатывается улучшенный метод запуска дистанционных автоматизированных тестов с использованием вызова удаленных процедур (Remote Procedure Call, RPC). Цель работы – создание эффективной и универсальной системы для автоматизированного тестирования ПО с помощью моделирования процессов тестирования, которая сократит время и ресурсы, затрачиваемые на выполнение тестовых сценариев, и обеспечит более высокую степень масштабируемости и адаптивности к различным тестируемым платформам и библиотекам. Отличительная особенность разрабатываемого диспетчера задач заключается в возможности проведения автоматизированного тестирования большого количества устройств без необходимости внесения значительных изменений в существующую инфраструктуру тестирования. Для этого используются системный подход к моделированию сложных систем, основные принципы кибернетики и общей теории систем.

Разработка метода дистанционного автоматизированного тестирования ПО.

Этапы тестирования ПО на протяжении его жизненного цикла занимают примерно 60 % всего процесса разработки [5]. Под эффективностью производственных процессов в данном случае понимается возможность их выполнения за минимальное время T . Говоря об эффективности этапа тестирования, время T зависит от количества устройств тестирования U , количества членов команды K , вероятности некорректного выполнения теста E по причине как человеческого фактора, так и программного сбоя. Взаимосвязь между параметрами определяется функцией $T = f(U, K, E(U, K))$, отвечающей следующим свойствам:

– чем больше устройств тестирования, тем больше время выполнения тестирования:

$$\frac{df}{dU} > 0;$$

– параллельное выполнение тестирования позволяет ускорить процесс: $\frac{df}{dK} < 0$;

– при увеличении численности команды растет вероятность ошибок: $\frac{dE(U, K)}{dK} > 0$;

– найденные ошибки увеличивают время тестирования: $\frac{dE(U, K)}{dT} > 0$.

Точный вид функций T и E специфичен для каждого проекта, поскольку следует учитывать программные и аппаратные особенности устройств, сложности задач, вследствие которых значительно повышается трудоемкость тестирования.

Тестирование всех возможных комбинаций программных компонентов ПО является непростой задачей, так как различные категории ПЭ могут иметь разные версии драйверов и прикладного ПО [6, 7]. Количество возможных комбинаций в случае сборки отдельно взятой категории ПЭ из взаимозаменяемых блоков равно:

$$N_c = HDS\gamma,$$

где H – количество вариантов аппаратного обеспечения; D – количество вариантов драйверов и S -версий ПО, использующего эти драйвера; γ – эмпирический понижающий коэффициент, применение которого обусловлено тем фактом, что на практике редко встречаются все возможные комбинации.

Тем не менее число вариаций программных компонентов ПЭ может превышать 100, что обуславливает необходимость повышения эффективности тестирования, т. е. совершенствования существующих алгоритмов и методов тестирования программной составляющей ПЭ в процессе разработки.

Предлагаемые диспетчер задач и агент для запуска тестирования ПО позволяют проводить дистанционное тестирование с использованием облачных сервисов, что дает следующие значимые преимущества:

- тестируемое ПО понятно для программистов и аналогично тестированию на физическом устройстве;
- отсутствует необходимость подготовки, запуска и сбора результатов тестирования каждой вариации версии программного компонента любой категории ПЭ в отдельности (этот процесс автоматически обобщается в единое целое).

Кластер, состоящий из управляющего сервера – диспетчера задач, серверов устройств и устройств, изображен на рис. 1.

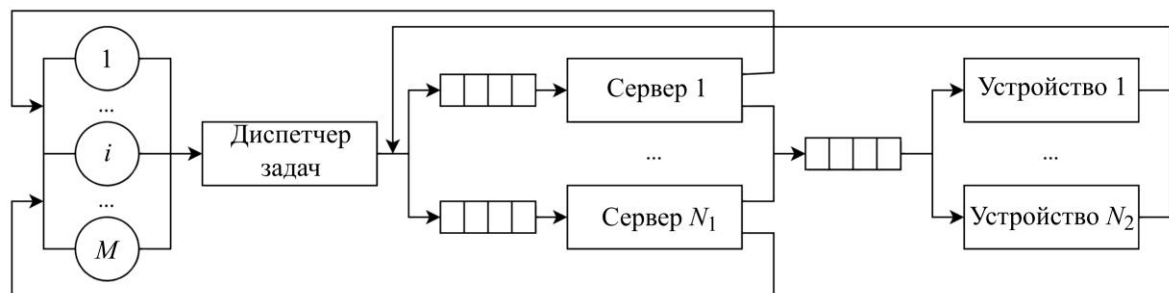


Рис. 1. Структурное представление марковской модели неоднородного кластера с общим доступом к устройствам тестирования

Fig. 1. Structural representation of the Markov model for a heterogeneous cluster with shared access to testing devices

Входной узел представляет собой управляющий сервер, который действует как диспетчер задач, распределяя тесты между серверами устройств (N_1 в общем количестве), имеющими разный функционал. Каждый сервер общается с устройствами тестирования, число которых составляет N_2 . В начале процесса тестирования число всех тестов определено как M .

Рассмотрим дискретную модель Маркова для данной системы массового обслуживания. Если представить устройства тестирования как однородные, то их можно принять в качестве многоканального устройства. Тесты размещаются в очереди с ограниченным размером, который не превосходит M . Обозначим время, необходимое для обработки тестовых сценариев на серверах и устройствах, T_i . Оно следует геометрическому распределению со средним значением для каждого $i = 1 \dots N_1 + N_2 + 1$; $q_i = \frac{\tau}{T_i}$ –

вероятность завершения обработки тестового сценария на серверах и тестирующих устройствах для i в указанном диапазоне; $r_i = 1 - q_i$ – вероятность того, что обработка теста будет продолжаться на входном узле, серверах или в комплексе устройств, где $i = 1 \dots N_1 + N_2 + 1$.

Для создания матрицы переходов $\vec{m} = (m_1, m_2, \dots, m_{N_1+N_2+1})$ рассмотрим размещение M тестов на N серверах, где m_i – количество задач в i -м сервере. Проанализируем возможные состояния. Представим множество состояний как $S = \left\{ (m_1, m_2, m_3) \mid \sum_{i=1}^N m_i = M \right\}$.

Количество состояний системы для одинакового количества задач $j = \sum_{i=1}^N m_i$ соответствует количеству размещений j задач на N серверах и определяется формулой $L_j = C_{j+N-1}^{N-1}$. Общий объем состояний задач на серверах рассчитывается по формуле $L = \sum_{j=0}^M L_j$.

Вектор $\vec{k} = (k_1, k_2, \dots, k_{N_1+N_2+1})$ описывает устройства, взаимодействующие с релевантным сервером. Для определения вектора стационарных вероятностей состояний $\vec{\pi} = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_M)$ необходимо решить систему равенств

$$\begin{cases} \pi_i = \sum_{j=1}^N P_{ji} \pi_j, i = 1 \dots L-1, \\ \sum_{i=1}^L \pi_i = 1, \end{cases}$$

относящуюся к рассматриваемой модели кластера, где π_i – вероятность обнаружения системы в i -м состоянии. Стационарные вероятности позволяют устанавливать средние показатели временных характеристик обслуживания и загрузки серверов и устройств.

Для расчета ключевых параметров определим множество $A_s = \{l \mid 0 \leq m_s(l) < k_s\}$, где $l \in \{1, L\}$ – номера состояния, $s \in \{1, N\}$ – номера узла кластера. Множество A_s включает в себя номера состояний, где в s -м узле обработки расположено меньше k_s задач.

Приведем пример расчета усредненных характеристик системы:

- количество свободных устройств s -го узла в состоянии $l - (k_s - m_s^l), l \in A_s$;
- количество занятых серверов и устройств в s -м узле $k_s^{\text{cp}} = k_s - \sum_{l \in A_s} (k_s - m_s(l)) \pi_l$;
- количество незанятых серверов и устройств в s -м узле $\sum_{l \in A_s} (k_s - m_s(l)) \pi_l$;
- загрузка серверов $\rho_s = \frac{k_s^{\text{cp}}}{k_s}$;
- количество тестовых сценариев в s -м узле $m_s^{\text{cp}} = \sum_{l=1}^L m_s(l) \pi_l$;
- количество тестовых сценариев в статусе ожидания $l_s^{\text{cp}} = m_s^{\text{cp}} - \rho_s k_s$;
- длительность нахождения тестового сценария $u_s = \frac{m_s^{\text{cp}}}{\rho_s \tau / q_s}$;

- время задержки обработки тестового сценария $\omega_s = \frac{l_s}{\rho_s \tau / q_s}$;
- время тестового сценария, проведенное в вычислительной системе $U = \sum_{s=1}^N u_s$;
- время задержки выполнения тестового сценария $W = \sum_{s=1}^N \omega_s$.

При соблюдении ряда условий, означающих долговременную непрерывность рассматриваемого процесса, соответствующие формулы будут справедливы. В случае возникновения каких-либо технологических перерывов значимого времени начала и окончания процесса тестирования реструктуризации и модификаций этого процесса более точные результаты могут быть получены методами имитационного моделирования с применением разработанного ПО для моделирования.

Дальнейшие этапы жизненного цикла ПО предусматривают поэтапный отказ от использования ранних модификаций ввиду их морального устаревания. Одновременно с этим происходит процесс модернизации как программной, так и аппаратной части в каждой категории ПЭ, что требует увеличения объема и модернизации тестовых сценариев. Таким образом, объем тестируемых реализаций сначала возрастает, достигая своего максимума в первой четверти жизненного цикла ПО, затем становится менее интенсивным. При отсутствии конкретных сведений о количестве версий программно-аппаратной реализации категории ПЭ, для которого разрабатывается тестируемое ПО, потенциально возможное количество оценивается с использованием комбинаторной комбинации «сочетание без повторов» [8, 9]. Это обусловлено тем, что рынок компонентов ПЭ представлен широким набором технически совместимых модулей с практически идентичными характеристиками, а при формировании продукта выбирается некоторое подмножество таких компонентов. Для построения модели, позволяющей получить количественные оценки необходимых ресурсов и затраченного времени, проанализированы шаги ручного и автоматизированного тестирования, а также автоматизированного тестирования с помощью прототипа с последующим представлением в виде набора не связанных между собой одно- и многоканальных систем массового обслуживания (СМО), которые взаимодействуют между собой посредством очередей и учитывают параметры, описанные на рис. 2 и рис. 3.

Приведем описание блоков, представленных на рис. 2:

- блок 1 – установка входных параметров алгоритма моделирования, где S_a – количество функций интерфейса ПО, подлежащих тестированию; S_d – количество моделей ПЭ, предназначенных для проверки; D_{\max} – верхний предел устройств, тестируемых одновременно; E_{\max} – наибольшее количество инженеров; R – число итераций моделирования;
- блок 2 – инициализация счетчика проведенных тестов;
- блок 3 – проверка значения счетчика шагов по методу Монте-Карло;
- блок 4 – формирование входных коэффициентов k для блока 5;
- блок 5 – определение параметров системы массового обслуживания на j -м этапе метода Монте-Карло (подробное изображение этого блока приведено на рис. 3);
- блок 6 – инкрементирование счетчика количества испытаний;
- блок 7 – расчет средних значений характеристик системы массового обслуживания.

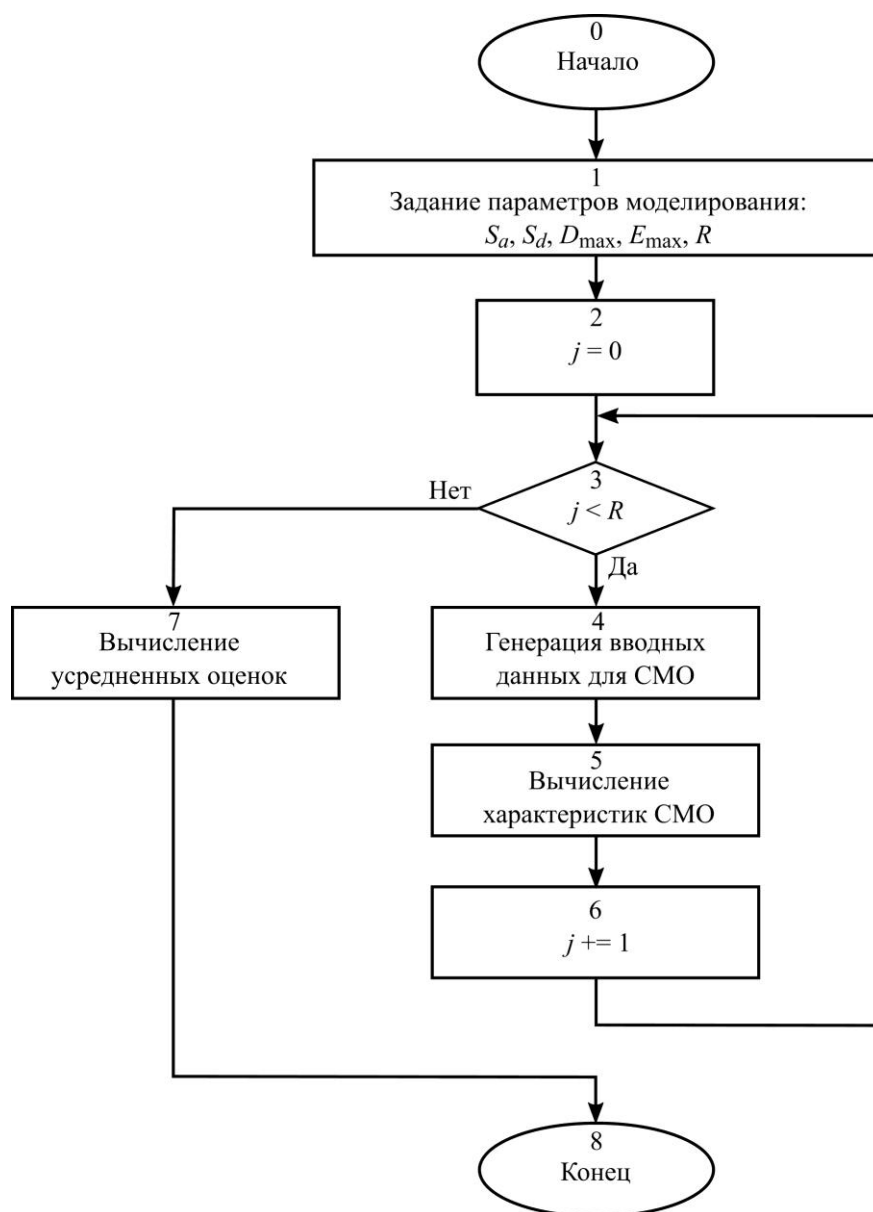


Рис. 2. Схема алгоритма моделирования нестационарной СМО
процесса тестирования ПО устройств ПЭ
Fig. 2. Algorithm scheme for modeling the non-stationary queueing system
of the software testing process for electronic devices

Приведем описание блоков, представленных на рис. 3:

- блок 0 – задание значений входных параметров алгоритма;
- блок 1 – расчет необходимого количества инженеров:

$$S_e = \min \left(\max \left(\frac{S_a}{\text{rand}(a, b)}, \frac{S_d}{\text{rand}(c, d)} \right), E_{\max} \right),$$

где a , c и b , d – соответственно минимальное и максимальное количество функций, используемых в тестовых сценариях для устройств ПЭ.

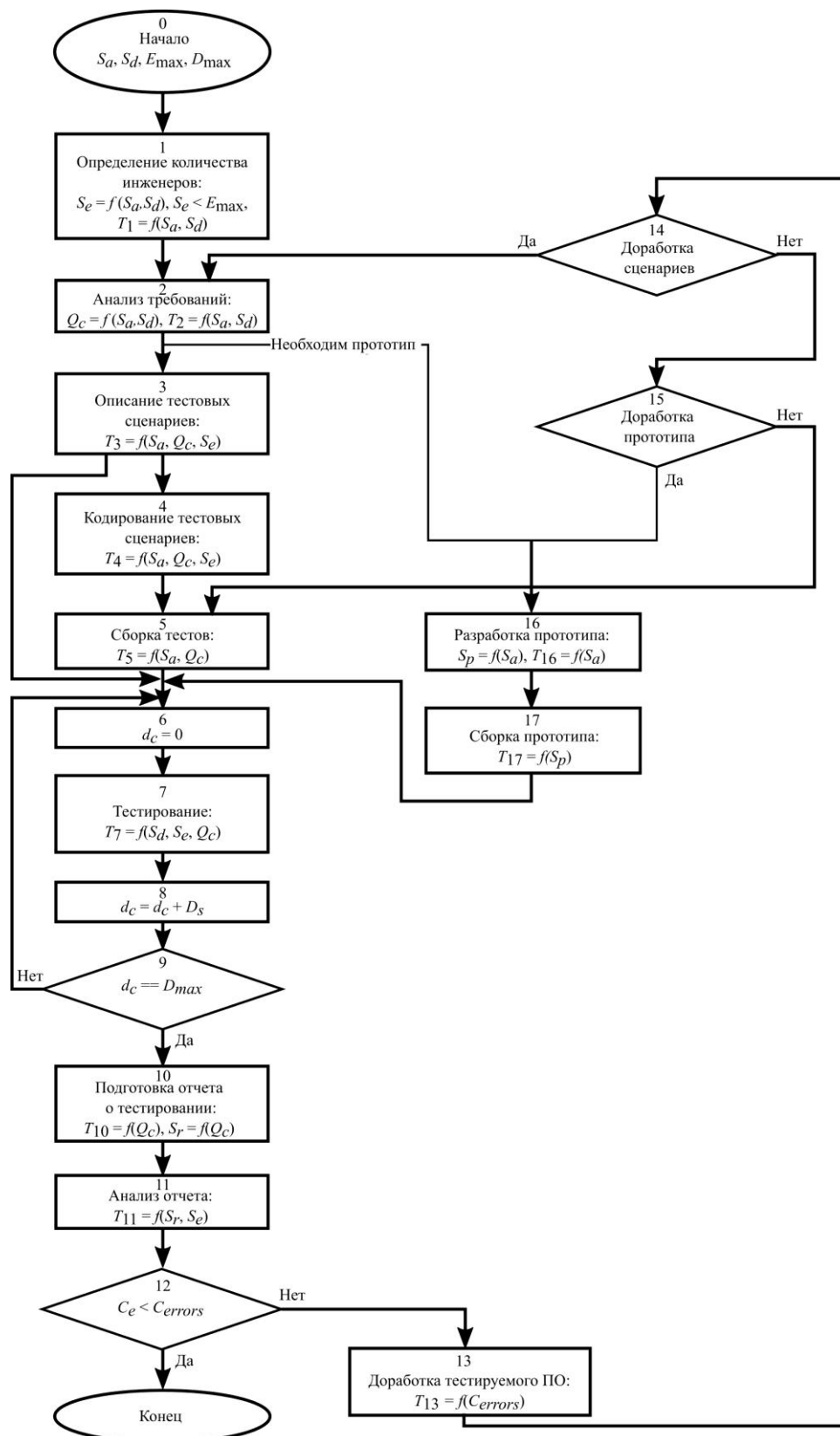


Рис. 3. Детализация блока 5 процесса тестирования ПО устройств ПЭ

Fig. 3. Detailing of the fifth block of the software testing process model for electronic devices

Время шага имеет вид

$$T_1(F, D, E_{\max}, S_F, S_D) = k_{1,1} \frac{F^{k_{1,2}} S_F}{E_{\max + k_{1,3}}(D^{k_{1,4}} S_D)},$$

здесь S_F – сложность функций (это может быть среднее значение или сумма индивидуальных сложностей всех функций); $k_{1,1}, k_{1,2}, k_{1,3}, k_{1,4}$ – коэффициенты, определяемые на основе статистических данных процесса разработки;

– блок 2 – расчет количества тестовых сценариев:

$$Q_c(S_a, S_d) = S_a (1 + (1 - k_{2,1}) S_d)$$

и времени выполнения шага:

$$T_2(S_a, S_d) = k_{2,2} e^{k_{2,3}(S_a + S_d)},$$

где $k_{2,1}, k_{2,2}, k_{2,3}$ – коэффициенты, определяемые на основе статистических данных процесса разработки;

– блок 3 – расчет времени, необходимого для описания тестовых сценариев:

$$T_3(Q_c, S_a, S_e) = \text{rand}(k_{3,1}, k_{3,2}) \frac{Q_c S_a}{S_e},$$

где $k_{3,1}, k_{3,2}$ – коэффициенты, определяющие время, необходимое для описания одного тестового сценария;

– блок 4 – расчет времени, необходимого для кодирования тестовых сценариев:

$$T_4(Q_c, S_a, S_e, S_c) = k_{4,1} S_c \frac{Q_c S_a}{S_e},$$

где S_c – усредненное значение сложности всех тестовых сценариев, рассчитываемое по

формуле $S_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{Q_c} S_{ci}$, где Q_c – количество тестовых сценариев;

– блок 5 – расчет времени, необходимого для кодирования тестовых сценариев:

$$T_5(Q_c) = \sum_{i=0}^{Q_c} \text{rand}(1, 10) t_{case},$$

где t_{case} – время сборки тестового сценария, использующего одну функцию;

– блок 6 – инициализация цикла тестирования;

– блок 7 – расчет времени тестирования:

$$T_7(Q_c, S_d, S_e, D_s) = \frac{(Q_c t_{case}) \frac{S_d}{D_s}}{S_e} + B S_d t_B,$$

где B – доля устройств, которые выходят из строя и требуют дополнительного времени (по статистике, вероятность выхода устройств составляет 10 %); t_B – дополнительное

время, необходимое для обработки устройства, вышедшего из строя (по статистике, данная операция занимает в среднем 30 мин);

– блок 8 – инкремент счетчика устройств;

– блок 9 – проверка статуса процесса тестирования. Если все тестовые сценарии выполнены на всех устройствах, то тестирование завершается;

– блок 10 – расчет необходимого времени для подготовки отчета по тестированию:

$$T_{10}(Q_c, S_e) = \frac{Q_c t_{case}}{S_e},$$

где t_{case} – коэффициент, отражающий время, требуемое для подготовки отчета по одному тестовому сценарию;

– блок 11 – расчет времени для анализа отчета:

$$T_{11}(Q_c) = \sum_{i=0}^{Q_c} rand(t_{min}, t_{max}),$$

где t_{min} и t_{max} – минимальное и максимальное время, необходимое для проведения анализа пунктов отчета;

– блок 12 – принятие решения о доработках ПО либо о завершении тестирования;

– блок 13 – доработка тестируемого ПО. Время выполнения рассчитывается по формуле

$$T_{13} = \frac{C_{errors} (1 + Q_c (k_{13,2} - k_{13,1}))}{1 - Q_c k_{13,1}},$$

где $k_{13,1}$, $k_{13,2}$ – коэффициенты, определяемые на основе статистических данных процесса тестирования;

– блок 14 – принятие решения о необходимости доработки тестовых сценариев;

– блок 15 – принятие решения о необходимости доработки прототипа;

– блок 16 – расчет размера прототипа: $S_p = k_{16,1} \log(S_a) + k_{16,2}$ и расчет времени выполнения шага: $T_{16} = k_{16,3} S_p$, где $k_{16,1}$, $k_{16,2}$, $k_{16,3}$ – коэффициенты, определяемые на основе статистических данных процесса тестирования;

– блок 17 – расчет времени сборки прототипа: $T_{17}(S_p) = S_p^{k_{17}}$, где k_{17} – коэффициент, определяемый на основе статистических данных процесса тестирования.

Анализ результатов моделирования. Результаты для этапа тестирования при моделировании в случае $R = 1\,000\,000$ представлены на рис. 4. Анализируя рисунок, можно сделать вывод, что в результате моделирования в случае модульного тестирования перепоключение устройств и исправление ошибок при подключении в среднем занимает 5,3 ч, для автоматизированного тестирования – 13,7 ч. Это существенно при регулярном проведении тестирования. Указанные этапы зависят от технической инфраструктуры, и возможность их улучшения заключается в применении усовершенствованных методов и инструментов для запуска тестов. В качестве улучшенного метода предлагается запуск автоматизированного тестирования с помощью RPC. Данный подход позволяет выделить тестируемое ПО в отдельный модуль в целях сокращения накладных расходов [10, 11].

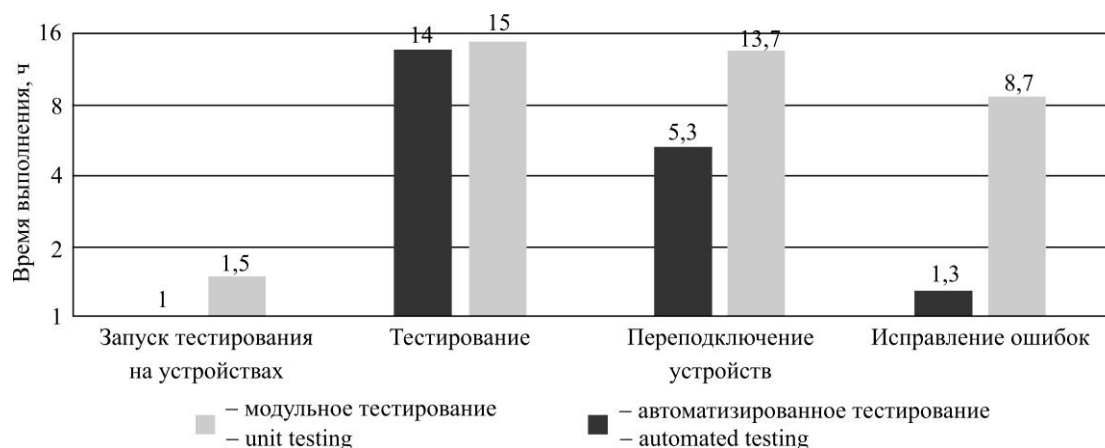


Рис. 4. Время выполнения шагов тестирования

Fig. 4. Time to perform steps in the testing

Проведено моделирование рассмотренных методов тестирования с последующим сравнением результатов с практическими значениями. Результаты представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что ручное тестирование занимает наибольшее количество времени ввиду особенностей этого метода. Определение затрачиваемого на ручное тестирование времени дает возможность оценить точность модели. Полученные результаты показали, что погрешность моделирования составляет около 16 %. Такая погрешность обусловлена влиянием человеческого фактора и технических аспектов.

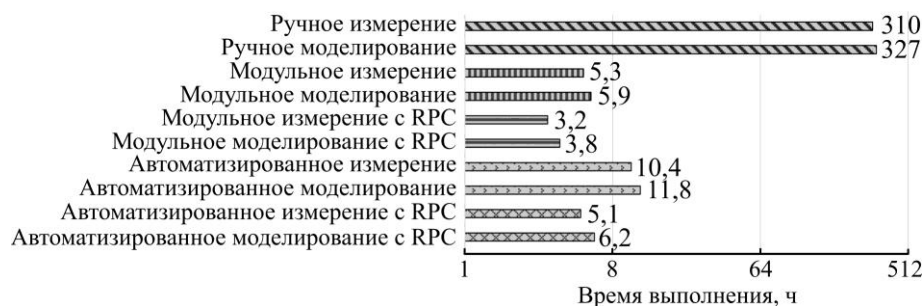


Рис. 5. Время выполнения ручного, модульного и автоматизированного тестирования

Fig. 5. Time to perform manual, modular and automated testing

При сравнении модульного и автоматизированного тестирования разница между практическими результатами и моделированными показателями незначительна. Это свидетельствует о высокой точности разработанной модели и указывает на возможность использования полученных результатов для последующего улучшения процесса тестирования. Тестирование с применением RPC-метода (см. рис. 5) в среднем занимает на 45 % меньше времени для выбранной конфигурации тестовой среды.

Заключение. В рамках практического эксперимента успешно создан и применен диспетчер задач, который эффективно регулирует процесс тестирования ПО устройств ПЭ, размещенных в облачном сервисе. Такой подход позволяет интегрировать существующие методы автоматизированного тестирования без необходимости вносить значительные изменения в их конструкцию. В результате достигается оптимизация процесса тестирования и значительное уменьшение временных расходов.

Результаты исследования демонстрируют успешное применение предложенного метода, что способствует повышению эффективности процесса тестирования.

Литература

1. TAdviser: Государство. Бизнес. Технологии [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tadviser.ru> (дата обращения: 01.08.2023).
2. Statista [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com> (дата обращения: 01.08.2023).
3. **Гагарина Л. Г., Шевнина Ю. С.** Моделирование цифрового двойника производственного процесса с использованием смарт-структуры // Системы компьютерной математики и их приложения. 2022. № 23. С. 84–90. EDN: UEMIJJ.
4. **Веселов В. Ф., Гагарина Л. Г.** Эмулятор вычислительного устройства с абсолютной точностью вычислений // Системы компьютерной математики и их приложения. 2022. № 23. С. 70–78. EDN: GTNYZV.
5. **Мухутдинов Р. А., Мухутдинов А. А., Коняева О. С.** CI/CD системы // Студенческий вестник. 2020. № 19-10 (117). С. 69–70. EDN: QGTKEQ.
6. **Карышев А. А., Ромашов П. А.** Система для автоматизации ручного тестирования программного обеспечения // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 2 (6). С. 140–146. EDN: WPNCXJ. URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/7a1f6e69f918d40ce7a55504eb1ff4af.pdf> (дата обращения: 28.08.2023).
7. **Михальчук В. Д., Решетникова И. В.** Использование ручного и автоматизированного тестирования ПО в гибких методологиях проектирования // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XV Междунар. науч.-практ. конф. (Курск, 19–20 марта 2020 г.). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 203–207. EDN: LSATBQ.
8. **Данилова А. А., Майорова Е. С.** Обзор патентной информации и источников периодической печати по теме: «Анализ автоматизированных систем тестирования программного обеспечения» // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 7-2. С. 22–26. EDN: WHDBAL.
9. **Тютюных А. А., Полевщиков И. С.** Разработка автоматизированной системы управления процессом тестирования программного обеспечения // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы Всерос. науч.-техн. конф. (Пермь, 17 мая 2018 г.): в 2 т. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического ун-та, 2018. Т. 1. С. 104–109. EDN: YVAQHB.
10. **Филиппов В. А., Хатько Е. Е.** Проблемы качества тестирования программного обеспечения для мультизадачных пользовательских комплексов // Качество. Инновации. Образование. 2011. № 3 (70). С. 32–35. EDN: ONDBML.
11. **Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А.** Методика построения веб-сервисов распределенных платформенно-независимых систем автоматизированного проектирования // Системы и средства информатики. 2014. Т. 24. № 1. С. 213–223. <https://doi.org/10.14357/08696527140113>. – EDN: SJHVPJ.

Статья поступила в редакцию 27.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 04.08.2023 г.; принята к публикации 08.08.2023 г.

Информация об авторах

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gagar@bk.ru

Букарев Антон Владимирович – соискатель ученой степени кандидата наук Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), anton@bukarev.org

References

1. TAdviser: Government. Business. IT. Available at: <https://tadviser.com> (accessed: 01.08.2023).
2. Statista. Available at: <https://www.statista.com> (accessed: 01.08.2023).
3. Gagarina L. G., Shevnina Ju. S. Modeling a digital twin of the production process using smart structure. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya*, 2022, no. 23, pp. 84–90. (In Russian). EDN: UEMIJJ.

4. Veselov V. F., Gagarina L. G. Computing device emulator with absolute precision computing. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya*, 2022, no. 23, pp. 70–78. (In Russian). EDN: GTNYZV.
5. Mukhutdinov R. A., Mukhutdinov A. A., Konyaeva O. S. CI/CD systems. *Studencheskiy vestnik*, 2020, no. 19-10 (117), pp. 69–70. (In Russian). EDN: QGTKEQ.
6. Karyshev A. A., Romashov P. A. The automation system of software testing. *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2016, no. 2 (6), pp. 140–146. (In Russian). EDN: WPNCXJ. Available at: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/7a1f6e69f918d40ce7a55504eb1ff4af.pdf> (accessed: 28.08.2023).
7. Mikhalechuk V. D., Reshetnikova I. V. Using manual and automated software testing in flexible design methodologies. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii: sb. nauch. tr. XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Kursk, 19–20 marta 2020 g.)*. Kursk, Southwest State University, 2020, pp. 203–207. (In Russian). EDN: LSATBQ.
8. Danilova A. A., Mayorova E. S. Review of patent information and periodical press sources on the topic: “Analysis of automated software testing systems”. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*, 2016, no. 7-2, pp. 22–26. (In Russian). EDN: WHDBAL.
9. Tyutyunikh A. A., Polevshchikov I. S. Development of an automated control system for the software testing process. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Perm', 17 maya 2018 g.)*, in 2 vol. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2018, vol. 1, pp. 104–109. (In Russian). EDN: YVAQHB.
10. Filippov V. A., Khatko E. E. Problems of testing quality of the software for multitask user complexes. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*, 2011, no. 3 (70), pp. 32–35. (In Russian). EDN: ONDBML.
11. Gridin V. N., Dmitrievich G. D., Anisimov D. A. Methodology of construction of web services of distributed platform-independent computer-aided design. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and Means of Informatics*, 2014, vol. 24, no. 1, pp. 213–223. (In Russian). <https://doi.org/10.14357/08696527140113>. – EDN: SJHVPJ.

The article was submitted 27.07.2023; approved after reviewing 04.08.2023;
accepted for publication 08.08.2023.

Information about the authors

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gagar@bk.ru

Anton V. Bukarev – Candidate of the Academic Degree of Candidate of Sciences of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), anton@bukarev.org

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Полные тексты статей журнала с 2004 по 2022 гг. доступны на сайтах
Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия
высших учебных заведений. Электроника»: <http://ivuz-e.ru>

ЮБИЛЕИ

Беспалову Владимиру Александровичу – 65 лет



1 октября 2023 г. исполнилось 65 лет Владимиру Александровичу Беспалову, ректору МИЭТ, члену-корреспонденту РАН, доктору технических наук, профессору.

В 1975 г. В. А. Беспалов поступил в Московский институт электронной техники на физико-технический факультет, который окончил в 1981 г. С 1981 по 1993 г. Владимир Александрович работал в НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина: инженером, научным сотрудником, старшим научным сотрудником, начальником лаборатории. С 1993 по 1996 г. В. А. Беспалов – заместитель генерального директора Зеленоградского научно-технологического парка на базе МИЭТ, с 2012 по 2016 г. – ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.

В 1991 г. В. А. Беспалов защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 2004 г. – диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В 2013 г. В. А. Беспалову присвоено ученое звание профессора.

В МИЭТ Владимир Александрович работает с 1994 г.: начальник лаборатории (1994–1998), проректор по финансовой и инновационной деятельности (1998–2008), проректор по научной и инновационной деятельности (2008–2009), первый проректор (2009–2016), ректор МИЭТ (с 2016 г. по настоящее время). В 2022 г. Владимир Александрович Беспалов избран членом-корреспондентом РАН.

Научные интересы В. А. Беспалова связаны с исследованиями и разработками в области микро- и нанoeлектроники и наноинженерии.

Владимир Александрович – автор и соавтор более 200 научных трудов, 5 монографий и 56 авторских свидетельств.

Владимир Александрович Беспалов – член Совета при Президенте РФ по науке и образованию, президиума Совета ректоров Ассоциации московских вузов, Научно-координационного совета Военно-инновационного совета АО «Технополис «Москва», наблюдательного совета АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» МИЭТ.

В. А. Беспалов – член редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

В. А. Беспалов удостоен премии Президента РФ в области образования за развитие инновационной деятельности, звания лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники, награжден орденом Дружбы и медалями, ему присвоено звание «Почетный работник науки и техники Российской Федерации».

Поздравляем Владимира Александровича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и дальнейшей плодотворной работы на благо российской науки и образования!

Редколлегия

Селищеву Сергею Васильевичу – 70 лет



4 сентября 2023 г. исполнилось 70 лет Сергею Васильевичу Селищеву, ученому в области биомедицинской инженерии и прикладной физики, доктору физико-математических наук, профессору.

В 1976 г. Сергей Васильевич Селищев окончил физико-технический факультет МИЭТ по специальности «Автоматика и электроника». С 1976 по 1978 г. работал в НИИ физических проблем (г. Москва, г. Зеленоград), с 1978 по 1983 г. – на кафедре микроэлектроники МИЭТ, с 1983 по 1990 г. – в Институте металлургии им. А. А. Байкова АН СССР.

В 1988 г. С. В. Селищев защитил диссертацию «Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии на материалы» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Поздравляем Сергея Васильевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов в научной и педагогической деятельности!

Редколлегия

С 1990 по 1999 г. С. В. Селищев – заведующий кафедрой теоретической и экспериментальной физики МИЭТ, с 1993 по 1995 г. – декан факультета электроники и компьютерных технологий МИЭТ. В 1993 г. Сергею Васильевичу присвоено ученое звание профессора по кафедре теоретической и экспериментальной физики.

С. В. Селищев – основатель, а затем заведующий (с 1999 по 2018 г.) кафедрой биомедицинских систем МИЭТ. С 2018 г. по настоящее время Сергей Васильевич является директором Института биомедицинских систем МИЭТ, созданного на базе кафедры.

С. В. Селищев – старший член международного общества «Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике» (IEEE). С 2008 г. Сергей Васильевич – главный редактор журнала «Медицинская техника» (журнал переводится на английский язык и издается издательством Springer под названием Biomedical Engineering), на протяжении многих лет работает в редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

С. В. Селищев – автор более 200 научных трудов. В 2010 г. ему присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», в 2015 г. – «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации».

Сидоренко Анатолию Сергеевичу – 70 лет



15 сентября 2023 г. исполнилось 70 лет Анатолию Сергеевичу Сидоренко, ученому в области физики конденсированных сред и низкоразмерных сверхпроводников, академику Академии наук Молдовы.

В 1975 г. А. С. Сидоренко окончил с отличием электрофизический факультет Технического университета Молдовы и поступил в аспирантуру Физико-технического института низких температур им. Б. Веркина НАН Украины. В 1979 г. А. С. Сидоренко защитил кандидатскую диссертацию, в 1991 – диссертацию на степень доктора (доктор хабилитат) физико-математических наук. С 1980 по 1992 г. Анатолий Сергеевич работал научным сотрудником в Институте прикладной физики Молдовы, в 1981 г. – в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав, Польша), в 1983 г. – в лаборатории низких температур Лоунасмаа Хельсинкского университета (Финляндия), в 1987 г. – в Институте фундаментальных исследований Тата (г. Мумбаи, Индия).

С 1993 по 2003 г. Анатолий Сергеевич был приглашенным профессором в Германии – в Университете Карлсруэ, Университете Аугсбурга и Институте нанотехнологий Научного центра Карлсруэ.

В 2004 г. А. С. Сидоренко получил Государственную премию Республики Молдова за цикл работ «Кинетические процессы и кооперативные явления в электронных материалах и наноструктурах». В то же время в Институте прикладной физики Академии наук Молдовы им организована лаборатория сверхпроводимости. В 2008 г., будучи директором Института электронной инженерии и нанотехнологий Академии наук Молдовы, Анатолий Сергеевич способствовал развитию нового стратегического направления исследований – функциональные наноструктуры для сверхпроводящей электроники и спинтроники. В 2012 г. А. С. Сидоренко избран членом Академии наук Молдовы.

С 2020 г. по настоящее время Анатолий Сергеевич Сидоренко – главный научный сотрудник Института электронной инженерии и нанотехнологий Технического университета Молдовы и научный руководитель лаборатории «Функциональные наноструктуры» Орловского государственного университета имени И. С. Тургенева. Одновременно с плодотворной научной работой академик А. С. Сидоренко ведет активную педагогическую деятельность: читает спецкурсы для мастерантов и аспирантов. Под его руководством защищены 12 кандидатских диссертаций и 1 на соискание ученой степени хабилитированного доктора наук.

Анатолий Сергеевич – рецензент журналов MDPI (Междисциплинарный цифровой издательский институт), член редакционного совета журнала Beilstein Journal of Nanotechnology, член редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

А. С. Сидоренко удостоен премии Академии наук Молдовы за научные достижения в области спинтроники, ему присужден орден Трудовой Славы (Орден «Gloria Muncii») Республики Молдова и присвоены звания «Om Emerit» и «Заслуженный изобретатель СССР».

Поздравляем Анатолия Сергеевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, благополучия и новых творческих свершений!

Редколлегия

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал «Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА» публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- фундаментальные исследования;
- материалы электроники;
- технологические процессы и маршруты;
- элементы интегральной электроники;
- схемотехника и проектирование;
- микро- и наносистемная техника;
- интегральные радиоэлектронные устройства;
- биомедицинская электроника;
- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемы высшего образования.

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом **в двух экземплярах**.

2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.

3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).

4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: <http://ivuz-e.ru/authors/>

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

- на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;
- на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать **ключевые слова** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

– печатается *через два интервала* с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

– абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только *по умолчанию*. Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, PDF, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

– оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

– нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

– русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык (для References).

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

– оформляется отдельным файлом;

– необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

– указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miec.ru

<http://ivuz-e.ru>

ПОДПИСКА 2024

Научно-технический журнал «Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА»

Периодичность журнала – 6 номеров в год

В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. На его страницах освещаются результаты научно-исследовательских работ, выполненных в вузах и НИИ, на промышленных предприятиях страны, методические аспекты преподавания с учетом современных требований и форм обучения, дается информация о научных конференциях. Формируются специальные выпуски по тематическому признаку.

Подписаться на печатную версию журнала можно:

- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис». Подписной индекс 38934
- **через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»:** <http://presskiosk.ru/categories>
- **через редакцию** – с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: www.rucont.ru; www.akc.ru; www.pressa-rf.ru
- ООО «Урал-Пресс Округ»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru



Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, дом 1, МИЭТ, комн. 7231

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

<http://ivuz-e.ru>

