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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

30 лет в науке и образовании

Том 30 № 6
Vol. 30 No. 6
ноябрь – декабрь
November – December
2025

ПОДПИСКА 2026

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): https://www.ural-press.ru/catalog
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- ООО «Руспресса»: http://abcpress.ru/
- ООО «ГЛОБАЛПРЕСС»: globalpress.ms@mail.ru
- подписное агентство «Криэйтив Сервис Бэнд»: https://periodicals.ru/
- редакцию – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

Сайт: http://ivuz-e.ru

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Том 30, № 6, 2025
ноябрь – декабрь

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., НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Громов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4563-9831
Душкин Александр Викторович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Коноплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Лабунов 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 «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Мещеряков Роман Валерьевич – д.т.н., проф., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1129-8434

© «Известия вузов. Электроника», 2025
© МИЭТ, 2025

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (г. Долгопрудный, 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
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Заведующая редакцией ***И. М. Доронина***
Редактор ***А. В. Тихонова***
Корректор ***И. В. Проскурякова***
Верстка ***А. Ю. Рыжков, С. Ю. Рыжков***

Адрес редакции: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.
Тел.: 8-499-734-6205, **e-mail:** magazine@miee.ru, **сайт:** http://ivuz-e.ru

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

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

Подписано в печать 09.12.2025. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 17,205 усл.печ.л., 14,816 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 7. 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 наноэлектроники, 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, в Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index. Является членом Crossref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934.
Подписной индекс в каталоге «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» – 47570.

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

Подорожний О. В., Киреев Г. С., Кузнецов В. А., Решетняк А. Р., Румянцев А. В. Электронно-микроскопические исследования монокристаллического кремния после облучения ионами ксенона низких энергий 683

Материалы электроники

Титов А. Ю., Вертянов Д. В., Артюшин Д. И., Коровина А. Ю., Коробова Н. Е., Рабцевич В. А., Гладкова С. И. Анализ влияния интерметаллидных фаз Al_xAu_y и Al_xCu_y на надежность микросварных соединений интегральных микросхем 694

Волков Р. Л., Киреев Г. С., Подорожний О. В., Решетняк А. Р., Аникин А. В., Боргардт Н. И. Характеризация наноразмерных слоев гетерокомпозиций с применением цифровой обработки данных просвечивающей электронной микроскопии 707

Схемотехника и проектирование

Волобуев П. С., Коршунов А. В. Безъемкостный регулятор напряжения для распределенных сетей питания ИС 721

Минаков Е. И., Макарецкий Е. А., Лагутин С. А., Переверзев А. Л., Лялин К. С. Анализ излучающих систем АФАР Ка-диапазона 731

Биомедицинская электроника

Новиков Д. В., Чумаченко Ю. В., Дубков С. В., Колмогоров В. С., Горелкин П. В., Ерофеев А. С., Пархоменко Ю. Н., Волкова Л. С., Железнякова А. В., Попенко В. Ф. Исследование процесса деградации ГКР-активных капилляров для комплексного использования в спектроскопии комбинационного рассеяния света и сканирующей ион-проводящей микроскопии 741

Информационно-коммуникационные технологии

Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Царапкин С. Ф., Семенов М. Ю., Минаков Е. И., Портнов Е. М. Модель принятия решений в управлении производством микроэлектроники на основе марковских процессов и уравнений Колмогорова 754

Смолин Р. В., Баландин И. А., Лаврентьев А. М., Андрющенков Е. Е. Способ двойного спектрального анализа и взвешенной обработки квазинепрерывных сигналов при отсутствии априорных сведений об их параметрах 763

Ефанов Д. В., Елина Е. И. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел. III. Эксперименты с тестовыми комбинационными схемами 774

Слюсарь М. В., Ссали Р. Особенности учета неопределенностей при машинной обработке естественных языков 788

Шань Гуанбао, Ли Голян, Ван Юйсюань, Ци Пэйхан, Гончаренко В. И., Волков А. С., Муратчаев С. С. Применение и перспективы методов искусственного интеллекта в прогнозировании и оптимизации целостности сигнала в микросистемах 795

Краткие сообщения

Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Котляров Е. Ю., Лосев В. В., Егоркин В. И. Экстракция параметров модели интегральной катушки индуктивности для технологического процесса GaN на кремнии 806

Юбилеи

Горбацевичу Александру Алексеевичу – 70 лет 813
Тельцу Виталию Арсеньевичу – 70 лет 815
Громову Дмитрию Геннадьевичу – 60 лет 816

Тематический указатель статей, опубликованных в 2025 году 817

К сведению авторов 823

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
The scientifical and technical journal
Volume 30, No. 6, 2025
November – December
Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Vladimir A. Bespalov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Alexandr V. Dushkin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Physics of the NAS of Belarus (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., NRC "Kurchatov Institute" (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Aleksandr A. Gorbatsevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Dmitry G. Gromov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-4563-9831
Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., President of RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Vladimir A. Labunov – Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company "Synopsys Armenia" (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2025
© MIET, 2025

Roman V. Meshcheryakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1129-8434
Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Moscow Institute of Physics and Technology (Dolgoprudny, 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.***
Editors ***Tikhonova A. V., Proskuryakova I. V.***
Make-up ***Ryzhkov S. Yu., Ryzhkov A. Yu.***

Editorial Board's address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET, editorial office of the Journal "Proceedings of Universities. Electronics".
Tel.: +7-499-734-62-05, **e-mail:** magazine@miee.ru, **website:** http://ivuz-e.ru

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

Signed to print 09.12.2025. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 17,205. Number of copies 150. Order no. 7. 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, 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.

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

CONTENTS

Fundamental researches

Podorozhniy O. V., Kireev G. S., Kuznetsov V. A., Reshetnyak A. R., Rumyantsev A. V. Electron microscopy studies of crystalline silicon after low-energy xenon ion irradiation 683

Electronics materials

Titov A. Yu., Vertyanov D. V., Artyushin D. I., Korovina A. Yu., Korobova N. E., Rabtsevich V. A., Gladkova S. I. Analysis of the intermetallic phases Al_xAu_y and Al_xCu_y impact on the reliability of microwelded joints of integrated circuits 694

Volkov R. L., Kireev G. S., Podorozhniy O. V., Reshetnyak A. R., Anikin A. V., Borgardt N. I. Heterocompositions nanoscale layers characterization using digital processing of transmission electron microscopy data 707

Circuit engineering and design

Volobuev P. S., Korshunov A. V. Capacitorless voltage regulator for ICs distributed power supply networks 721

Minakov E. I., Makaretsky E. A., Lagutin S. A., Pereverzev A. L., Lyalin K. S. Analysis of active phased array radiating systems of the Ka band 731

Biomedical electronics

Novikov D. V., Chumachenko J. V., Dubkov S. V., Kolmogorov V. S., Gorelkin P. V., Erofeev A. S., Parkhomenko Yu. N., Volkova L. S., Zheleznyakova A. V., Popenko V. F. Investigation of the degradation process of SERS-active capillaries for complex use in Raman spectroscopy and scanning ion conductance microscopy 741

Information-communication technologies

Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Tsarapkin S. F., Semenov M. Yu., Minakov E. I., Portnov E. M. A decision-making model in microelectronics production management based on Markov processes and Kolmogorov equations 754

Smolin R. V., Balandin I. A., Lavrentiev A. M., Andryushchenkov E. E. A technique of double spectral analysis and weighted processing of quasi-continuous signals in the absence of a priori information about their parameters 763

Efanov D. V., Yelina Y. I. Sum codes of the weight coefficients of digits from a natural series of numbers. III. Experiments with combinational benchmarks 774

Sliusar M. V., Ssali R. Features of accounting for uncertainties in machine processing of natural languages 788

Shan Guangbao, Li Guoliang, Wang Yuxuan, Qi Peihan, Goncharenko V. I., Volkov A. S., Muratchaev S. S. Application and prospects of artificial intelligence methods in predicting and optimizing signal integrity in microsystems 795

Brief reports

Khlybov A. I., Rodionov D. V., Kotlyarov E. Yu., Losev V. V., Egorkin V. I. Parameter extraction of the integrated inductance coil model for GaN-on-Si technology process 806

Anniversaries

Gorbatsevich Aleksandr Alekseevich is 70 years old 813

Telets Vitaly Arsenievich is 70 years old 815

Gromov Dmitry Gennadievich is 60 years old 816

Thematic index of articles published in 2025 817

Instructions for authors 823

Научная статья
УДК 537.534.35
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-683-693
EDN: RYOBHQ

Электронно-микроскопические исследования монокристаллического кремния после облучения ионами ксенона низких энергий

О. В. Подорожний**, *Г. С. Киреев, В. А. Кузнецов, А. Р. Решетняк, А. В. Румянцев

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

* *podorozhniy_oleg@rambler.ru*

Аннотация. В современных нанотехнологиях для эффективного применения ионных пучков необходимо проводить исследования взаимодействия ускоренных ионов с атомами облучаемых материалов. Состояние приповерхностных областей, подвергнутых ионному воздействию при создании и модификации различных структур, оказывает существенное влияние на их характеристики, поэтому важное значение имеют данные о распределении имплантированных ионов пучка в образце и их влиянии на структуру аморфизованного материала. В работе с применением методов просвечивающей растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа изучены образцы подложек монокристаллического кремния поперечного сечения, облученных ионами ксенона с энергией 5 и 8 кэВ и дозой около 10^{16} $см^{-2}$. На изображениях и картах распределения химических элементов выявлены кластеры, образованные имплантированными атомами ксенона в аморфизованном слое кремния. Получены и обработаны микрофотографии образца поперечного сечения подложки, бомбардированной ионами с энергией 8 кэВ. Определены геометрические параметры кластеров ксенона, модальный размер которых составил 1,5 нм. Методом дифракции электронов проведены дополнительные исследования подготовленной тонкой фольги планарного сечения. Проведено сравнение профилей концентрации имплантированных атомов ксенона, полученных экспериментально, с результатами компьютерного моделирования методом Монте-Карло с использованием разных механизмов дегазации имплантированных атомов. Экспериментально установленные и расчетные значения пиковой концентрации ксенона хорошо согласуются и составляют около 5 ат. %.

© О. В. Подорожний, Г. С. Киреев, В. А. Кузнецов, А. Р. Решетняк, А. В. Румянцев, 2025

Ключевые слова: ионная имплантация, кремний, ксенон, цифровая обработка изображений, дифракция электронов, метод Монте-Карло

Финансирование работы: экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2023-0003) с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов», работы по моделированию – в рамках реализации программы развития Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» при поддержке программы государственной поддержки университетов Российской Федерации «Приоритет 2030» национального проекта «Наука и университеты».

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры физической электроники МГУ имени М. В. Ломоносова канд. физ.-мат. наук А. Е. Иешкину и Д. К. Миннебаеву за предоставленные образцы монокристаллического кремния, облученного ионами ксенона.

Для цитирования: Подорожний О. В., Киреев Г. С., Кузнецов В. А., Решетняк А. Р., Румянцев А. В. Электронно-микроскопические исследования монокристаллического кремния после облучения ионами ксенона низких энергий. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):683–693. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-683-693. EDN: RYOBHQ.

Original article

Electron microscopy studies of crystalline silicon after low-energy xenon ion irradiation

O. V. Podorozhniy**, G. S. Kireev, V. A. Kuznetsov, A. R. Reshetnyak, A. V. Rumyantsev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *podorozhniy_oleg@rambler.ru*

Abstract. In modern nanotechnology, the studies of the interaction of accelerated ions with atoms of irradiated materials are necessary for the effective use of ion beams. The state of the near-surface regions subjected to ion irradiation during the fabrication and modification of various structures significantly affects their characteristics, hence the data on the distribution of implanted beam ions in the sample and their effect on the structure of the amorphized material are of importance. In this work, cross-sectional samples were prepared from single-crystal silicon substrates irradiated with xenon ions with a dose of about 10^{16} cm^{-2} and energy of 5 and 8 keV, and then were studied by scanning transmission electron microscopy and energy-dispersive X-ray microanalysis. Clusters formed by implanted xenon atoms in the amorphized silicon layer were revealed in the obtained images and chemical element distribution maps. The experimental images of the cross-sectional sample of the substrate bombarded with 8 keV ions were obtained and processed. The geometric parameters of xenon clusters, the modal size of which was 1.5 nm, have been determined. Additional studies of the prepared plan-view thin foil specimen were carried out using the electron diffraction technique. The experimental profiles of the implanted xenon atom concentration were compared with the results obtained by Monte Carlo computer simulations using different mechanisms of implanted atom outgassing. The experimentally determined and calculated values of the peak xenon concentration are in good agreement and amount to about 5 at. %.

Keywords: ion implantation, silicon, xenon, digital image processing, electron diffraction, Monte Carlo technique

Funding: the experimental studies were carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment (Agreement FSMR-2023-0003) using the equipment of the Center for Collective Use "Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects", the modeling work was carried out within the framework of the implementation of the development program of the National Research University of Electronic Technology with the support of the state support program for universities of the Russian Federation "Priority 2030" of the national project "Science and Universities".

Acknowledgments: the authors would like to thank A. E. Ieshkin, Cand. Sci. (Phys.-Math), and D. K. Minnebaev, members of the Department of Physical Electronics at Lomonosov Moscow State University, for providing samples of single-crystal silicon irradiated with xenon ions.

For citation: Podorozhniy O. V., Kireev G. S., Kuznetsov V. A., Reshetnyak A. R., Rumyantsev A. V. Electron microscopy studies of crystalline silicon after low-energy xenon ion irradiation. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2025;30(6): 683–693. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-683-693.

Введение. Пучки ускоренных ионов используются для ионной имплантации [1], очистки, полировки [2], наноструктурирования поверхности образцов различными методами, в том числе методом фокусированного ионного пучка (ФИП) [3, 4]. Облучение подложек широкими и фокусированными пучками ионов инертных газов эффективно, поскольку они практически не вступают в химические реакции с другими элементами и не образуют соединений с атомами облучаемых материалов, что важно при обработке поверхности [5, 6]. Такие ионы применяются, в частности, для изменения проводимости образцов [7, 8], улучшения их пьезоэлектрических свойств [1, 9], формирования наноструктур на поверхности подложек [3], а также в ионно-лучевых методах исследований, например в ионной микроскопии [10, 11].

В ряде случаев предпочтительным является использование тяжелых ионов, таких как ксенон. В [12] отмечено, что облучение ионами ксенона на финальных стадиях обработки поверхности кварцевого стекла значительно улучшает ее качество. Формирование волнообразного рельефа на поверхности кремния при облучении ионами ксенона низких энергий рассматривается в [13]. Развитие плазменных источников дает возможность применять ионы ксенона, обеспечивающие высокий коэффициент распыления материала, в системах с ФИП [4, 14].

Состав и структура приповерхностной области образца, аморфизованной при создании и модификации различных структур ионными пучками, в том числе методом ФИП, оказывают существенное влияние на их характеристики [15]. Одним из процессов, влияющих на свойства обрабатываемого материала, является имплантация ионов пучка в подложку. Вследствие этого исследование нарушенного при ионной бомбардировке слоя образца [16, 17] и распределения имплантированных ионов пучка по его глубине [18, 19] – важная задача.

Для изучения аморфизованных слоев применяются методы просвечивающей электронной микроскопии, позволяющие получать изображения с атомарным разрешением [20, 21], энергодисперсионного рентгеновского микроанализа, с помощью которого устанавливается распределение имплантированных ионов пучка в образце, и дифракции электронов для анализа ближнего порядка атомных расположений. При этом, как правило, методом дифракции электронов изучаются образцы, облученные ионами высоких

энергий, для которых такое исследование проводится с применением тонкой фольги поперечного сечения.

В настоящей работе методами просвечивающей электронной микроскопии исследуется структура приповерхностной области монокристаллического кремния, облученного ионами ксенона Xe^+ с энергией 5 и 8 кэВ.

Эксперимент. Бомбардировку образцов монокристаллического кремния Si(001) осуществляли в условиях сверхвысокого вакуума ионами ксенона Xe^+ с энергией 5 и 8 кэВ и дозой около 10^{16} см$^{-2}$ при их нормальном падении на поверхность образца. В качестве источника ионов использовали дуоплазматрон. Для достижения однородности облучения сканирование пучка осуществляли вдоль поверхности бомбардируемой подложки.

Затем полученные образцы переносили из низкоэнергетического имплантера в камеру электронно-ионного микроскопа FEI Helios NanoLab 650, где из облученных областей методом *in situ lift-out* [22] перпендикулярно направлению [110] приготавливали тонкую фольгу поперечного сечения, которую исследовали методами просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа в приборе FEI Titan Themis 200 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Для защиты поверхности образцов на последующих этапах препарирования на нее последовательно осаждали два слоя платины и аморфного углерода (Pt + *a*-C) с применением электронного и ионного пучков соответственно. Тонкую фольгу вырезали из объемного материала при ускоряющем напряжении пучка 30 кВ и затем с помощью микроманипулятора переносили на специализированную медную сетку для дальнейшего утонения с постепенным снижением ускоряющего напряжения пучка до 5, 2 и 1 кВ. Для исследований методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа использовали образцы толщиной примерно 30–40 нм. Это позволило добиться высокого уровня рентгеновского сигнала, сократить время его сбора и, соответственно, снизить суммарную дозу облучения и вносимые электронным пучком изменения в образец. Для детального изучения закономерностей расположения имплантированных атомов ксенона после облучения кремния пучком ионов с энергией 8 кэВ дополнительно подготовили тонкий образец поперечного сечения толщиной около 10 нм.

Для получения дифракционной картины электронов в области кремния, облученной ионами ксенона с энергией 8 кэВ, подготовлен образец планарного сечения с применением специальной процедуры, подробно описанной в [23]. Ввиду малой толщины аморфизованного ионным воздействием приповерхностного слоя образцу при утонении придавали клиновидную форму.

Визуализация аморфизованных слоев. Для получения ПРЭМ-изображений образцы поперечного сечения ориентировали так, чтобы падающий электронный пучок распространялся вдоль направления [110]. На рис. 1 представлены микрофотографии приповерхностных областей исследованных образцов и профили концентрации ксенона $C_{Xe}(x)$ вдоль оси x, направленной перпендикулярно к поверхности подложки. Аморфизованный при облучении слой *a*-Si и кристаллический кремний *c*-Si визуализируются на микрофотографиях как более и менее темные области соответственно, а участки образца, содержащие имплантированные атомы ксенона, – как светлые области.

Неравномерный светлый контраст в области аморфизованного кремния, наблюдаемый на рис. 1, *а*, *в* и соответствующий имплантированным атомам ксенона, дает возможность предположить, что они образуют кластеры. Поскольку ПРЭМ-изображения на рис. 1, *а*, *в* получены от относительно толстых образцов, наблюдается наложение кластеров ксенона, что не позволяет исследовать их форму и размеры. Слой с высокой концентрацией имплантированных атомов отделен от поверхности и кристаллической области подложки тонкими слоями, обедненными атомами ксенона.

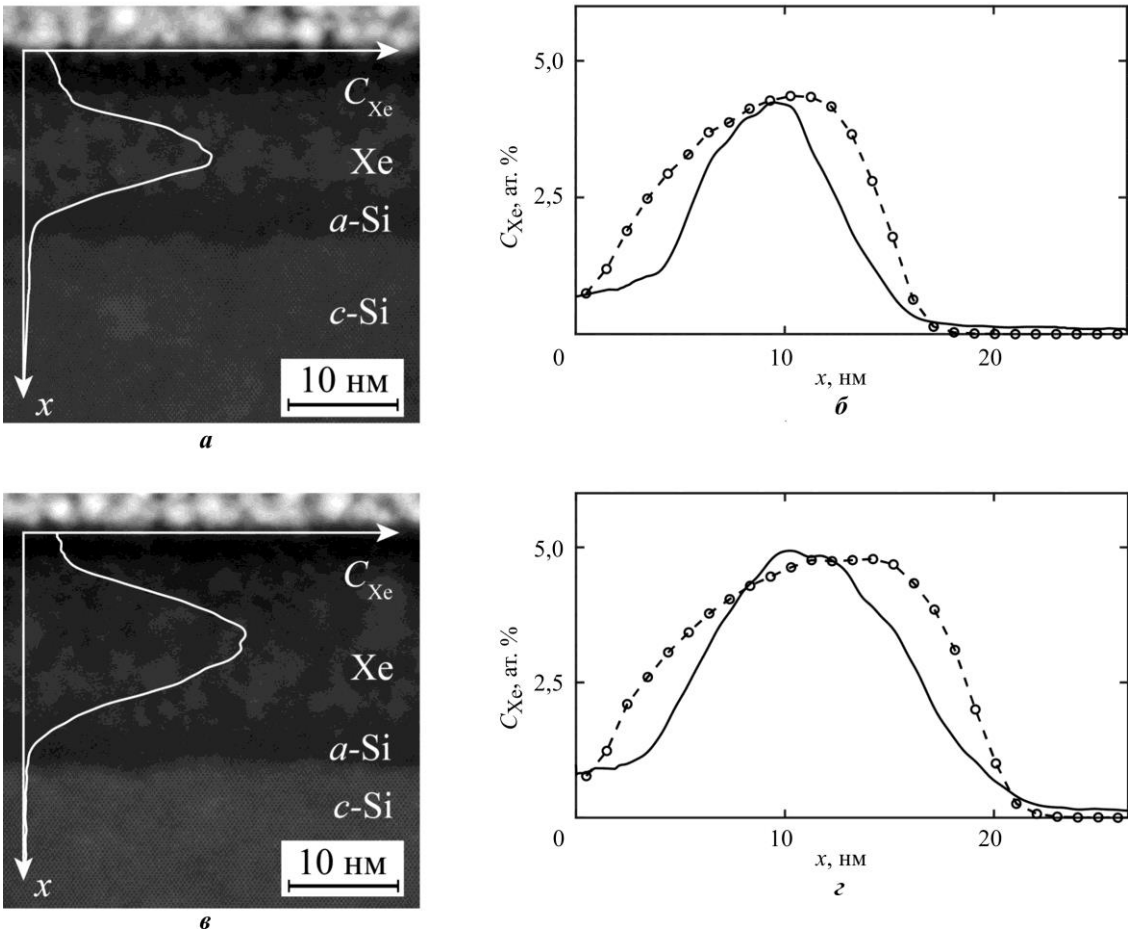


Рис. 1. ПРЭМ-изображения облученных областей (*а*, *в*) и профили концентрации имплантированных атомов ксенона (*б*, *г*) для энергии ионов пучка 5 кэВ (*а*, *б*) и 8 кэВ (*в*, *г*): —— эксперимент; –○– моделирование

Fig. 1. STEM images of the irradiated areas (*a*, *c*) and concentration profiles of the implanted xenon atoms (*b*, *d*) for the ion beam energies of 5 keV (*a*, *b*) and 8 keV (*c*, *d*) respectively: —— experiment; –○– modeling

Профили $C_{Xe}(x)$ получены усреднением двумерных карт распределения атомов ксенона в направлении, параллельном поверхности подложки (рис. 1, *б*, *г*). Они имеют характерную форму с выраженным максимумом. Пиковые значения концентрации имплантированных атомов ксенона равны примерно 4 и 5 ат. %, средний размер самых крупных кластеров ксенона оценочно составляет 1,5–2,5 и 3–4 нм при облучении ионами с энергией 5 и 8 кэВ соответственно. Толщина аморфизованных слоев на приведенных ПРЭМ-изображениях составляет примерно 16 и 21 нм, что хорошо совпадает со значениями, полученными после обработки светлопольных электронно-микроскопических изображений [24].

Определение геометрических параметров кластеров ксенона. На рис. 2, *а*, *б* представлены ПРЭМ-изображение и карта распределения ксенона на образце поперечного сечения кремния толщиной около 10 нм, облученного ионами ксенона с энергией 8 кэВ. Такая толщина образца позволяет минимизировать проекционные эффекты на экспериментальном ПРЭМ-изображении, однако некоторые кластеры по-прежнему образуют локальные скопления с невыраженными межкластерными границами.

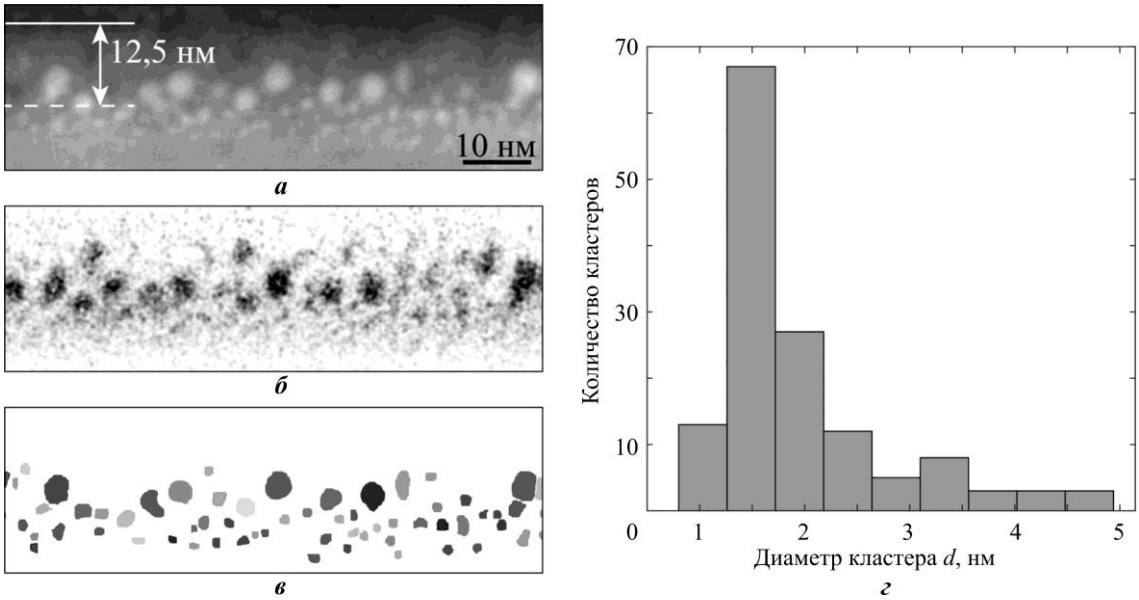


Рис. 2. ПРЭМ-изображение приповерхностной области образца, облученного ионами ксенона с энергией 8 кэВ (*а*); карта распределения имплантированных атомов ксенона (*б*); обработанное изображение с выделенными кластерами ксенона (*в*) и гистограмма распределения размера кластеров (*г*). На рис. 2, *а* —— положение поверхности образца; – – – центр крупного кластера, наиболее удаленного от поверхности

Fig. 2. STEM image of the near-surface area of the sample, irradiated with 8 keV ions (*a*); corresponding map of distribution of the implanted xenon atoms (*b*); processed image with highlighted xenon clusters (*c*); histogram of distribution of cluster sizes (*d*). In fig. 2, *a* —— position of the sample surface; – – – the center of a large cluster, farthest from the surface

Для выявления отдельных кластеров внутри скоплений микрофотографии анализировали с помощью процедуры цифровой обработки, разработанной в программном пакете Matlab с использованием математических операций, описанных в [25]. Вначале на исходной ПРЭМ-микрофотографии устраняли шумы с применением среднегеометрического фильтра и выравнивали фон на основе top-hat-фильтрации. Для разделения скоплений кластеров полученное изображение бинаризовали методом *k*-средних [26, 27] и вычитали из него бинаризованное изображение морфологического градиента. На результирующем изображении получены связные области, называемые маркерами, каждая из которых располагается внутри определенного кластера и однозначно определяет его положение. Полученные маркеры использовали для разделения дополнительно сглаженного градиентного изображения на участки, в пределах каждого из которых находится только один кластер. На заключительном этапе цифровой обработки для каждого такого участка применяли метод морфологических водоразделов. Разделенные кластеры находятся внутри найденных данным методом границ.

Результат цифровой обработки ПРЭМ-изображения приведен на рис. 2, *в*. Для характеризации размеров кластеров вычисляли диаметры d кругов соответствующей площади. Затем проводили интервальную группировку размеров 141 найденного кластера по 9 интервалам равной величины и строили соответствующую гистограмму распределения их размеров (рис. 2, *г*). Гистограмма имеет асимметричную форму с длинным правым хвостом до 5 нм. Модальный размер кластеров составил ≈ 1,5 нм.

Для анализа распределения имплантированного ксенона по глубине кластеры условно разделяли на два вида: крупные ($d > 3$ нм) и мелкие ($d < 3$ нм), доля которых от общего количества составила 13 и 87 % соответственно. Крупные кластеры располага-

ются в аморфизованном кремнии на расстоянии до 12,5 нм от поверхности, глубже находятся кластеры более мелких размеров. В ограниченном линиями приповерхностном слое (см. рис. 2, *а*) имеются 19 крупных кластеров и 29 мелких. Как показывает анализ профиля концентрации на рис. 1, *г*, в данном слое содержится 60 % внедренных атомов ксенона. Следовательно, большая часть имплантированных атомов сконцентрирована в малом количестве крупных кластеров.

Исследование методом дифракции электронов. Для получения дифракционной картины электронов образец планарного сечения кремниевой подложки, облученной ионами с энергией 8 кэВ, ориентировали таким образом, чтобы электронный пучок распространялся вдоль направления [100]. Длина камеры 410 мм. Электронограмма, приведенная на рис. 3, *а*, получена от области образца планарного сечения, содержащей часть подложки монокристаллического кремния, и откалибрована с использованием соответствующих рефлексов. Согласно данным энергодисперсионного рентгеновского микроанализа, концентрация ксенона в исследуемой области составляет около 1 ат. %.

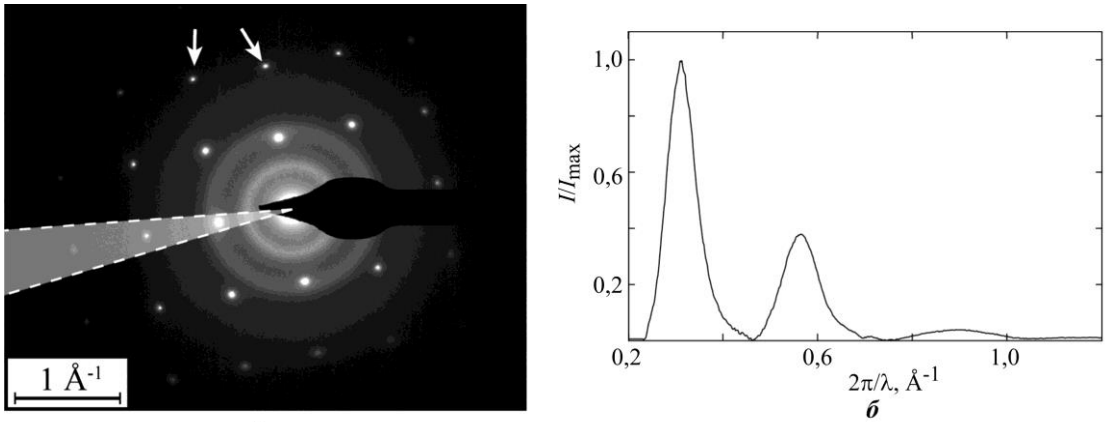


Рис. 3. Картина электронной дифракции (*а*) и ее нормированный профиль интенсивности (*б*). Белый треугольник – пример сектора, использованного для вырезания рефлексов от подложки, стрелки – рефлексы от монокристаллической подложки кремния

Fig. 3. Electron diffraction pattern (*a*) and its normalized intensity profile (*b*). Example of the sector used to cut the diffraction spots corresponding to the substrate is shown with white triangle, diffraction spots from the single-crystal silicon substrate are indicated with arrows

Для анализа аморфной структуры облученного кремния электронограмма обработана посредством удаления иглы и рефлексов от монокристаллической подложки путем вырезания секторов, ограниченных двумя лучами, выходящими из центра электронограммы (см. рис. 3, *а*). Применение такого подхода позволило получить информацию об интенсивности рассеяния на аморфном материале, не нарушая симметрии дифракционной картины. Распределение азимутально усредненной интенсивности рассеяния построено с использованием пакета программ PASAD [28]. Из него вычитали фон, подогнанный с помощью аппроксимации сплайном. Полученный профиль интенсивности рассеяния I с вычтенным фоном, нормированный на интенсивность первого пика I_{max}, показан на рис. 3, *б*. Положения пиков на профиле интенсивности совпадают с ранее установленными пиками для аморфного кремния, осажденного двумя способами [29]. Однако высота первого пика относительно второго несколько меньше установленной в [29], что может свидетельствовать о менее упорядоченной структуре материала, аморфизованного ионами ксенона.

Моделирование методом Монте-Карло. Моделирование облучения кремниевой подложки ионами ксенона проводили методом Монте-Карло в приближении бинарных столкновений в программном пакете SDTrimSP 5.07 [30]. Вычисления осуществляли в динамическом режиме с учетом имплантации ионов в образец с использованием потенциала межатомного взаимодействия KrC [31]. Неупругие потери энергии ионами рассчитывали на основе стандартной смешанной модели Oen-Robinson / Lindhard [32, 33]. Количество траекторий, рассчитываемых при моделировании, составило 50 000. Значение поверхностной энергии связи атомов кремния соответствует значению энергии сублимации химически чистого кремния, равному 4,7 эВ [34]. Поверхностная энергия связи атомов ксенона равна 0 эВ. Поверхностная энергия связи атомов кремния и ксенона в соответствии с [35] равна 0,2 эВ.

Для адекватного описания процесса бомбардировки ионами инертных газов необходимо принимать во внимание перемещение в образце и дегазацию имплантированных ионов пучка, не образующих химических связей с атомами материала подложки. В применяемом программном пакете возможно одновременное моделирование с помощью двух механизмов дегазации [36]. Первый из них связан с диффузией, индуцированной генерацией точечных дефектов во время облучения. При этом учитывается коэффициент η_0. Второй механизм описывает перемещение атомов, вызванное локальным градиентом давления в приповерхностной области образца, который возникает в результате внедрения ионов пучка. Для расчета соответствующего потока атомов вводится коэффициент K_0. В настоящей работе $\eta_0 = 1{,}7 \cdot 10^6$ Å^4/ион, $K_0 = 200$ Å^3/ион [30].

Смоделированные профили концентрации имплантированных атомов ксенона показаны на рис. 1. Видно, что моделирование методом Монте-Карло позволяет с хорошей точностью воспроизводить экспериментальные профили концентрации, включая положение и высоту пиков. Основные расхождения с экспериментом наблюдаются в обедненных ксеноном слоях ближе к краям аморфизованной области, в особенности вблизи поверхности образца, что, по-видимому, связано с дегазацией атомов ксенона.

Коэффициенты распыления кремния, полученные в процессе моделирования, равны 1,91 и 2,32 для ионов с энергией 5 и 8 кэВ соответственно. Данные значения хорошо согласуются с известными значениями, равными 2,0 и 2,3 [37]. Отметим, что моделирование без учета описанных механизмов дегазации приводит к значительной переоценке концентрации имплантированных атомов, которая достигает 40 ат. % (в эксперименте данный параметр составляет 5–10 ат. %).

Заключение. Проведенные исследования показали, что имплантированные атомы ксенона распределены по глубине образца и их пиковая концентрация составляет около 5 ат. % для энергии пучка 5 и 8 кэВ. Полученные микрофотографии свидетельствуют о том, что имплантированные атомы ксенона образуют кластеры. Цифровая обработка изображений позволила выявить распределение кластеров по размерам и определить их модальный размер, равный 1,5 нм. Большая часть имплантированных атомов ксенона содержится в малочисленных кластерах размером более 3 нм. Применение двух механизмов дегазации при моделировании ионной бомбардировки методом Монте-Карло обеспечивает хорошее согласование результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных.

Литература / References

1. Ghosh B., Ray S. C., Pattanaik S., Sarma S., Mishra D. K., Pontsho M., Pong W. F. Tuning of the electronic structure and magnetic properties of xenon ion implanted zinc oxide. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(9):095304. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaa832
2. Li Y., Takino H., Frost F. Ion beam planarization of diamond turned surfaces with various roughness profiles. *Optics Express.* 2017;25(7):7828–7838. https://doi.org/10.1364/OE.25.007828
3. Vásquez L., Redondo-Cubero A., Lorenz K., Palomares F. J., Cuerno R. Surface nanopatterning by ion beam irradiation: Compositional effects. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2022;34(33):333002. https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac75a1
4. Höflich K., Hobler G., Allen F. I., Wirtz T., Rius G., McElwee-White L. et al. Roadmap for focused ion beam technologies. *Appl. Phys. Rev.* 2023;10(4):041311. https://doi.org/10.1063/5.0162597
5. Sawyer W. D., Weber J., Nabert G., Schmälzlin J., Habermeier H.-U. Implantation and diffusion of noble gas atoms during ion-beam etching of silicon. *J. Appl. Phys.* 1990;68(12):6179–6186. https://doi.org/10.1063/1.346908
6. Fleischer E. L., Norton M. G. Noble gas inclusions in materials. *Heterogen. Chem. Rev.* 1996;3:171–201.
7. Vashist L., Gopidi H. R., Khan M. R., Malyi O. I. Noble gas functional defect with unusual relaxation pattern in solids. *J. Phys. Chem. Lett.* 2023;14(40):9090−9095. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.3c01580
8. Burcea R., Bouteiller H., Hurand S., Eklund P., Barbot J.-F. Effect of induced defects on conduction mechanisms of noble-gas-implanted ScN thin films. *J. Appl. Phys.* 2023;134(5):055107. https://doi.org/10.1063/5.0137428
9. Fiedler H., Fuchs F., Leveneur J., Nancarrow M., Mitchell D. R. G., Schuster J., Kennedy J. Giant piezoelectricity of deformed aluminum nitride stabilized through noble gas interstitials for energy efficient resonators. *Adv. Electron. Mater.* 2021;7(8):2100358. https://doi.org/10.1002/aelm.202100358
10. Hlawacek G., Veligura V., Gastel R. van, Poelsema B. Helium ion microscopy. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2014;32(2):020801. https://doi.org/10.1116/1.4863676
11. Petrov Yu. V., Vyvenko O. F. Scanning reflection ion microscopy in a helium ion microscope. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2015;6(1):1125–1137. https://doi.org/10.3762/bjnano.6.114
12. Chkhalo N. I., Churin S. A., Pestov A. E., Salashchenko N. N., Vainer Yu. A., Zorina M. V. Roughness measurement and ion-beam polishing of super-smooth optical surfaces of fused quartz and optical ceramics. *Optics Express.* 2014;22(17):20094–20106. https://doi.org/10.1364/OE.22.020094
13. Ziberi B., Frost F., Höche T., Rauschenbach B. Ripple pattern formation on silicon surfaces by low-energy ion-beam erosion: Experiment and theory. *Phys. Rev. B.* 2005;72(23):235310. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.235310
14. Smith N. S., Notte J. A., Steele A. V. Advances in source technology for focused ion beam instruments. *MRS Bulletin.* 2014;39(4):329–335. https://doi.org/10.1557/mrs.2014.53
15. Donovan E. P., Hubler G. K., Waddell C. N. Correlation of optical changes in amorphous Ge with enthalpy of relaxation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 1987;19–20(2):590–594. https://doi.org/10.1016/S0168-583X(87)80118-0
16. Huang J., Loeffler M., Muehle U., Moeller W., Mulders H., Kwakman L., Zschech E. A study of gallium FIB induced silicon amorphization using TEM, APT and BCA simulation. *Microsc. Microanal.* 2015;21(S3):1839–1840. https://doi.org/10.1017/S1431927615009976
17. Румянцев А. В., Приходько А. С., Боргардт Н. И. Исследование аморфизации кремния ионами галлия на основе сопоставления расчетных и экспериментальных электронно-микроскопических изображений. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2020;(9):103–108. https://doi.org/10.31857/S1028096020090174. EDN: ANPIOI.
    Rumyantsev A. V., Prikhodko A. S., Borgardt N. I. Study of gallium-ion-induced silicon amorphization by matching experimental and simulated electron-microscopy images. *J. Surf. Investig.* 2020;14:956–960. https://doi.org/10.1134/S1027451020050171
18. 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;28(5):555–568. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-555-568. EDN: ZCQJUF.
    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 a silicon substrate. *Semiconductors.* 2023;57(1):58–64. https://doi.org/10.1134/S1063782623010086

19. Бачурин В. И., Журавлев И. В., Пухов Д. Э., Рудый А. С., Симакин С. Г., Смирнова М. А., Чурилов А. Б. Угловые зависимости распыления кремния фокусированным ионным пучком галлия. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2020;(8):34–41. https://doi.org/10.31857/S102809602008004X. EDN: JNFXJY.
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;14:784–790. https://doi.org/10.1134/S1027451020040229
20. Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Prikhodko A. S., Chaplygin Yu. A. Characterizing interface structure between crystalline and ion bombarded silicon by transmission electron microscopy and molecular dynamics simulations. *Appl. Surf. Sci.* 2020;540(1):148278. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148278
21. Calligaris G. A., Lang R., Bettini J., Santos A. O. dos, Cardoso L. P. Xenon nanobubbles and residual defects in annealed Xe-implanted Si(001): Analysis by the combination of advanced synchrotron X-ray diffraction and transmission electron microscopy techniques. *Adv. Mater. Technol.* 2024;9(12):2301621. https://doi.org/10.1002/admt.202301621
22. Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J. TEM sample preparation and FIB-induced damage. *MRS Bulletin.* 2007;32(5):400–407. https://doi.org/10.1557/mrs2007.63
23. Prikhodko A. S., Zallo E., Calarco R., Borgardt N. I. A refined plan-view specimen preparation technique for high-quality electron microscopy studies of epitaxially grown atomically thin 2D layers. *Ultramicroscopy.* 2024;267:114063. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2024.114063
24. Подорожний О. В., Румянцев А. В., Боргардт Н. И., Миннебаев Д. К., Иешкин А. Е. Исследование аморфизации кремния ионами ксенона с использованием просвечивающей электронной микроскопии и моделирования методом Монте-Карло. *Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования.* 2025;(3):45–50. https://doi.org/10.31857/S1028096025030074. EDN: ELTCQI.
Podorozhniy O. V., Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Minnebaev D. K., Ieshkin A. E. Study of xenon ion-induced silicon amorphization using transmission electron microscopy and Monte Carlo simulation. *J. Surf. Investig.* 2025;19(2):309–313. https://doi.org/ 10.1134/S1027451025700430.
25. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений.* 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера; 2012. 1104 с.
Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital image processing.* 3rd ed. New York: Pearson; 2007. 976 p.
26. Dhanachandra N., Manglem K., Chanu Y. J. Image segmentation using *K*-means clustering algorithm and subtractive clustering algorithm. *Procedia Comput. Sci.* 2015;54:764–771. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.090
27. Arthur D., Vassilvitskii S. *K*-means++: The advantages of careful seeding. In: *SODA'07: Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms.* New Orleans, LA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2007, pp. 1027–1035.
28. Gammer C., Mangler C., Rentenberger C., Karnthaler H. P. Quantitative local profile analysis of nanomaterials by electron diffraction. *Scripta Materialia.* 2010;63(3):312–315. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.04.019
29. 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;5(2):025905. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1
30. Mutzke A., Schneider R., Eckstein W. et al. *SDTrimSP Version 5.05.* Garching: IPP; 2015. 70 p.
31. Wilson W. D., Haggmark L. G., Biersack J. P. Calculations of nuclear stopping, ranges, and straggling in the low-energy region. *Phys. Rev. B.* 1977;15(5):2458. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.15.2458
32. Oen O. S., Robinson M. T. Computer studies of the reflection of light ions from solids. *Nucl. Instrum. Methods.* 1976;132:647–653. https://doi.org/10.1016/0029-554X(76)90806-5
33. Lindhard J., Scharff M. Energy dissipation by ions in the keV region. *Phys. Rev.* 1961;124(1):128. https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.128
34. Eckstein W. *Computer simulation of ion-solid interactions.* Berlin; Heidelberg: Springer; 1991. xi, 296 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73513-4
35. Süle P., Heinig K.-H. The molecular dynamics simulation of ion-induced ripple growth. *J. Chem. Phys.* 2009;131(20):204704. https://doi.org/10.1063/1.3264887
36. Mutzke A., Eckstein W. Ion fluence dependence of the Si sputtering yield by noble gas ion bombardment. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2008;266(6):872–876. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.01.053
37. Wittmaack K. Analytical description of the sputtering yields of silicon bombarded with normally incident ions. *Phys. Rev. B.* 2003;68(23):235211. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.235211

Информация об авторах

Подорожний Олег Витальевич – аспирант Института физики и прикладной математики, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), podorozhniy_oleg@rambler.ru

Киреев Георгий Сергеевич – аспирант Института физики и прикладной математики, инженер Центра коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), g.s.kireev@ya.ru

Кузнецов Вадим Александрович – магистрант Института физики и прикладной математики, инженер научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kuznetsov0ii21@gmail.com

Решетняк Александра Романовна – магистрант Института физики и прикладной математики, инженер научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), reshaleksandra50602@mail.ru

Румянцев Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, 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

Information about the authors

Oleg V. Podorozhniy – PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Junior Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), podorozhniy_oleg@rambler.ru

Georgii S. Kireev – PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Engineer of Center for Collective Use “Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), g.s.kireev@ya.ru

Vadim A. Kuznetsov – Master’s degree student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Engineer of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kuznetsov0ii21@gmail.com

Alexandra R. Reshetnyak – Master’s degree student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Engineer of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), reshaleksandra50602@mail.ru

Alexander V. Rumyantsev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior 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

Поступила в редакцию / Received 28.11.2024
Поступила после рецензирования / Revised 20.12.2024
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 621.3.049.77:620.193,16
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-694-706
EDN: QTYOZR

Анализ влияния интерметаллидных фаз Al_xAu_y и Al_xCu_y на надежность микросварных соединений интегральных микросхем

***А. Ю. Титов*[1*], *Д. В. Вертянов*[1], *Д. И. Артюшин*[2], *А. Ю. Коровина*[2], *Н. Е. Коробова*[1], *В. А. Рабцевич*[1], *С. И. Гладкова*[1]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*АО «НИИМА «Прогресс», г. Москва, Россия*

[*] *kisrpi@mail.ru*

Аннотация. В микросварных соединениях интегральных микросхем, микросборок и систем в корпусе образующиеся интерметаллидные фазы в контактах Al-Cu и Al-Au вызывают хрупкость и пористость интерметаллидных соединений. В результате механические и электрические свойства Al-Cu, Al-Au ухудшаются. В работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов формирования интерметаллидов и надежности проволочных микросварных соединений Al_xAu_y и Al_xCu_y в микросхемах. Для проволочных соединений Al-Au и Al-Cu рассчитаны сопротивления и максимальные постоянные токи. Установлены зависимости максимальных механических напряжений и температур от диаметра проволоки при максимальном токе потребления для микросхем. По результатам моделирования отрыва золотой и медной проволок от алюминиевой контактной площадки с учетом влияния интерметаллидных фаз даны практические рекомендации по использованию отечественных материалов. Установлено, что максимальные механические напряжения возникают в месте приложения силы и по краям области интерметаллидного соединения. Выявлено, что, несмотря на рост предельной нагрузки на растяжение с увеличением диаметра проволоки от 18 до 27 мкм, основным лимитирующим фактором является смещение области максимальных механических напряжений на края контактной площадки (для меди и золота) и образование пустот Киркендалла в интерметаллидном соединении (для золота), что снижает общую надежность соединения. Результаты исследования могут быть использованы при формировании проволочных микросварных соединений Al_xAu_y и Al_xCu_y в интегральных микросхемах.

© А. Ю. Титов, Д. В. Вертянов, Д. И. Артюшин, А. Ю. Коровина, Н. Е. Коробова, В. А. Рабцевич, С. И. Гладкова, 2025

Ключевые слова: термозвуковая микросварка, интерметаллиды, механические напряжения, интегральная микросхема

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2022-0002) и Российского научного фонда по проекту НИР «Исследование влияния легирующих элементов и покрытий материала проволочных выводов на процессы формирования интерметаллидов и надежность микросварных соединений Al-Au и Al-Cu интегральных микросхем» (Соглашение № 23-91-06012).

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D микросистем» МИЭТ за ценные консультации и всестороннюю поддержку на протяжении данного исследования.

Для цитирования: Титов А. Ю., Вертянов Д. В., Артюшин Д. И., Коровина А. Ю., Коробова Н. Е., Рабцевич В. А., Гладкова С. И. Анализ влияния интерметаллидных фаз Al_xAu_y и Al_xCu_y на надежность микросварных соединений интегральных микросхем. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):694–706. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-694-706. EDN: QTYOZR.

Original article

Analysis of the intermetallic phases Al_xAu_y and Al_xCu_y impact on the reliability of microwelded joints of integrated circuits

A. Yu. Titov[1*], D. V. Vertyanov[1], D. I. Artyushin[2], A. Yu. Korovina[2], N. E. Korobova[1], V. A. Rabtsevich[1], S. I. Gladkova[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]JSC NIIMA Progress, Moscow, Russia

** kisrpi@mail.ru*

Abstract. In microwelded joints of integrated circuits, microassemblies, and packaged systems, the formation of intermetallic phases at Al-Cu and Al-Au interfaces induces brittleness and porosity within the intermetallic compounds. Consequently, the mechanical and electrical properties of the Al-Cu and Al-Au systems degrade. In this work, the findings of an experimental study on the formation processes of intermetallics and the reliability of Al_xAu_y and Al_xCu_y wire bonds in microcircuits are presented. The resistance and maximum allowable direct current were calculated for Al-Au and Al-Cu wire bonds. The dependencies of maximum mechanical stress and temperature on wire diameter under maximum supply current for microcircuits have been established. Based on the simulation of gold and copper wire pull-off from an aluminum bond pad, accounting for the influence of intermetallic phases, practical guidelines for the use of domestic materials are provided. It was determined that the peak mechanical stresses occur at the point of force application and along the edges of the intermetallic joint region. The study has revealed that despite an increase in ultimate tensile load with larger wire diameters (from 18 to 27 μm), the primary limiting factor is the shift of the maximum stress concentration to the edges of the bond pad (for both copper and gold) and the formation of Kirkendall voids

within the intermetallic compound (for gold), which collectively reduces the overall joint reliability. The research results can be applied in the fabrication of Al_xAu_y and Al_xCu_y wire-bonded interconnections for integrated circuits.

Keywords: thermosonic microwelding, intermetallics, mechanical stresses, integrated circuit

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state task (Agreement FSMR-2022-0002) and by the Russian Science Foundation under the research project "Investigation of impact of alloying elements and coatings of wire bonds material on intermetallic formation processes and reliability of Al-Au and Al-Cu microwelded joints of integrated circuits" (Agreement no. 23-91-06012).

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the staff of the Research Laboratory "Advanced Packaging and 3D Microsystems Manufacturing Technologies" for their valuable consultations and comprehensive support throughout this study.

For citation: Titov A. Yu., Vertyanov D. V., Artyushin D. I., Korovina A. Yu., Korobova N. E., Rabtsevich V. A., Gladkova S. I. Analysis of the intermetallic phases Al_xAu_y and Al_xCu_y impact on the reliability of microwelded joints of integrated circuits. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):694–706. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-694-706.

Введение. В полупроводниковой промышленности технологии термозвукового соединения медных проводов обширно исследуются с целью замены дорогостоящих золотых проводов. Однако возникает проблема надежности микросварных соединений, так как рост и эволюция слоя интерметаллидных соединений (ИМС) приводят к объемной усадке и, следовательно, к образованию пустот на интерфейсе соединения медной проволоки и алюминиевой контактной площадки (КП) после отжига при высокой температуре. Термозвуковая микросварка межсоединений в ИС представляет собой комбинацию ультразвуковой сварки с дополнительным источником тепла. Ультразвуковая энергия убирает загрязнения на контактных поверхностях и с силой соединяет необработанные поверхности связующего материала с помощью энергии, подаваемой от источника тепла [1]. Исследования показали, что в результате совокупного воздействия параметров сварки и других факторов (например, конструкции соединения и физических свойств основного металла) снижаются свойства сварки Al-Cu или Al-Au и образуются хрупкие ИМС [2–6]. В системе Al-Cu основными ИМС являются AlCu, Al_2Cu и Al_4Cu_9. В начале процесса диффузии образуется ИМС Al_2Cu, так как растворимость меди в алюминии меньше, чем алюминия в меди. Скорость диффузии Cu ($6{,}5\cdot10^{-5}$ м^2/с) больше, чем у Al ($4{,}5\cdot10^{-5}$ м^2/с), поэтому после формирования фазы Al_2Cu медь диффундирует через нее, происходит миграция границы раздела между Al и Al_2Cu в сторону алюминия и формируется Al_4Cu_9. По такому же принципу происходит образование ИМС AlCu и Al_2Cu_3 [7].

Для системы Al-Au характерно образование нескольких интерметаллидных фаз (ИМФ), в частности AlAu, Al_2Au, $AlAu_2$, $AlAu_4$ и Al_3Au_8 (известной также как Al_2Au_5 [6]). Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что доминирующими и наиболее часто встречающимися являются фазы $AlAu_4$ и Al_3Au_8 [5, 6]. Кинетика роста резко изменяется, когда израсходован алюминий. С этого момента скорость роста $AlAu_4$ увеличивается за счет Al_3Au_8, который является источником алюминия для продолжения эволюции системы. Это качественно согласуется с экспериментальными результатами. В работах [8, 9] установлено, что, когда израсходован алюминий, толстый слой

Al_3Au_8 превращается в слой $AlAu_4$, который растет в основном на границе раздела с более богатой алюминием фазой, в то время как пустоты остаются вблизи границы раздела с золотой проволокой. Если интерпретировать данные особенности как «маркерные частицы» для визуализации пустот Киркендалла, то такое поведение ожидаемо для соединений, в которых диффузия золота является доминирующей и алюминий почти не диффундирует. Однако в экспериментах, если толщина каждой фазы согласуется с теоретическими значениями, установлено, что диффузия по границам зерен или другим дефектам решетки происходит быстрее, чем в идеально упорядоченных объемных ИМФ, в частности, из-за наличия столбчатых зерен как в Al_3Au_8, так и в $AlAu_4$ [5, 6]. В [8] рассмотрены дефекты микросварных соединений золото – алюминий в корпусах микросхем, возникающие со временем при воздействии повышенной температуры, описаны этапы образования пустот Киркендалла и исследованы факторы, влияющие на прочность, пластичность и хрупкость микросварных соединений золото – алюминий. Для повышения производительности и уменьшения размера кристаллов в работах [10–13] предлагается использовать медь в качестве замены золота из-за низкой стоимости и высокой электромиграционной стойкости. Однако медь подвержена окислению в среде с более высокой температурой, что создает значительные проблемы при соединении проводов.

В настоящей работе изучается микроструктура интерфейса и ее влияние на прочность микросварных соединений. С помощью моделирования, позволяющего преодолевать экспериментальные ограничения при монтаже кристаллов в корпусировании микросхем, исследуется надежность сложных ИМС.

Моделирование микросварных проволочных соединений на отрыв. Для моделирования выбрали проволочное соединение шарик-клин между кристаллом микросхемы и металлокерамическим корпусом МК 5125.40-1 с габаритами 6,9 × 6,9 × 1,8 мм под кристалл размером 3,6 × 3,6 × 0,28 мм (рис. 1, *а*, *б*). Герметизацию корпуса проводили методом пайки с помощью прокладки.

Испытание на растяжение является общепринятым методом для оценки прочности проволочных соединений. Метод предполагает натяжение крючком проволоки до ее обрыва или отрыва от КП. Крючок обычно располагают таким образом, чтобы силы, действующие на обе связи, были равны [14]. Для моделирования использовали золотую проволоку 4N (99,99 %) длиной 1,4 мм (рис. 1, *в*). В основание золотого шарика имитирована сформированная ИМФ $AlAu_4$ толщиной 0,5 мкм (рис. 2, *а*). Материал имеет следующие характеристики для ИМФ с пустотами Киркендалла (рис. 2, *б*): модуль Юнга фазы 40,79 ГПа, коэффициент Пуассона 0,448 [15].

Для определения предела текучести используется приближение – правило смещения на 0,2 %. Рассчитанный по этому

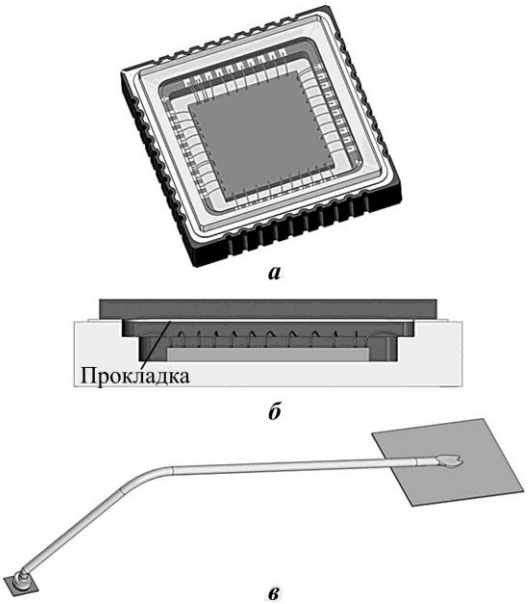


Рис. 1. Модель кристалла 1382НМ025 в корпусе МК 5125.40-1 в общем виде с прозрачной крышкой (*а*), в разрезе (*б*) и модель для испытания проволоки на отрыв (*в*)

Fig. 1. Model of the 1382HM025 die in the MK 5125.40-1 package in general view with a transparent cover (*a*), cross-sectional view (*b*) and wire bond pull test model (*c*)

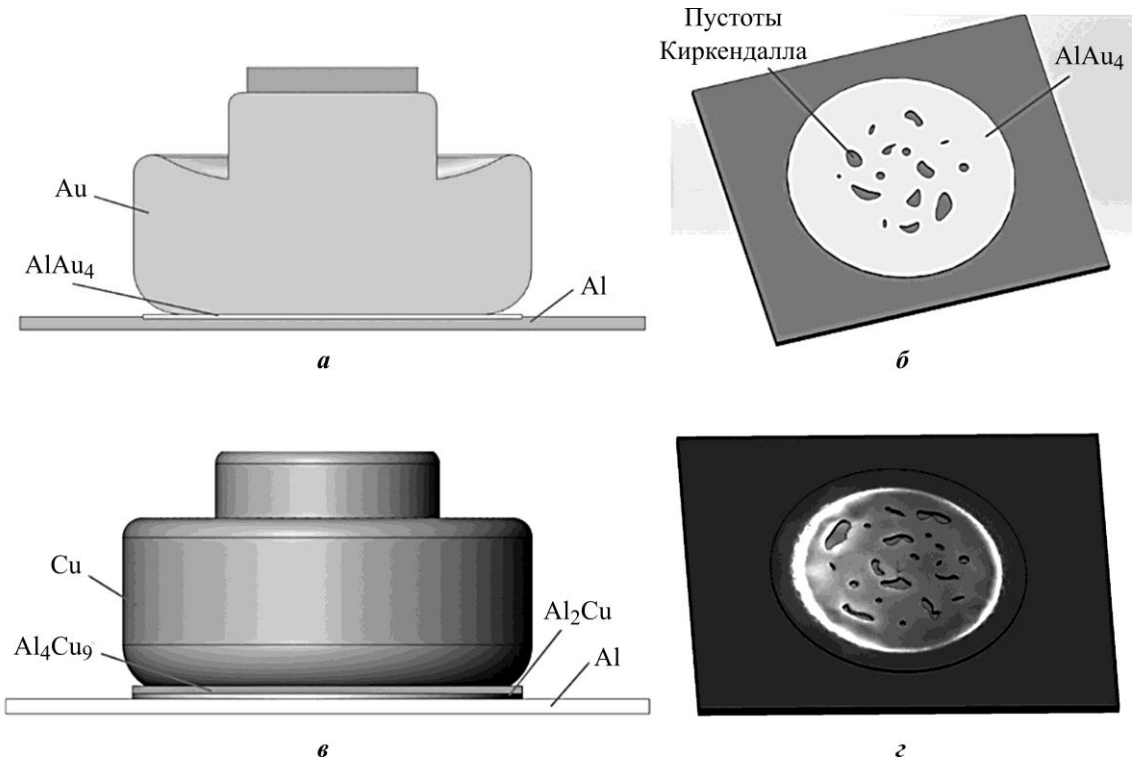


Рис. 2. Результаты моделирования соединений золотой и медной проволок с алюминиевой КП: *а* – структура разреза золотого шарика; *б* – модель имитации ИМФ с пустотами Киркендалла; *в* – модель шарика для системы Al-Cu с ИМФ Al_4Cu_9 и Al_2Cu; *г* – распределение напряжений в слое ИМФ

Fig. 2. Simulation results of gold and copper wires joints with an aluminum contact pad: *a* – cross-sectional structure of gold ballon; *b* – a model of intermetallic phase imitation with a Kirkendall voids; *c* – model of a ball for an Al-Cu system with the intermetallic phases Al_4Cu_9 and Al_2Cu; *d* – distribution of stress in the intermetallic phase layer

правилу предел текучести составляет ~ 81 МПа. На рис. 2, *в* для медной проволоки показаны ИМФ Al_4Cu_9 и Al_2Cu толщиной 1,2 мкм без пустот. Материал имеет следующие усредненные характеристики: модуль Юнга 180 ГПа и 98,95 ГПа, коэффициент Пуассона 0,24 и 0,34 соответственно [16, 17].

Моделирование проводили для диаметра проволоки от 18 до 27 мкм. Для каждого типа проволоки учтены допустимые значения механического воздействия [17, 18]. Установлено, что максимальные механические напряжения возникают в месте приложения силы и по краям области ИМС (рис. 2, *г*). У проволочных соединений диаметром 22–25 мкм максимальные механические напряжения наблюдаются в шарике. На рис. 3, *а* приведена зависимость максимальных напряжений на контакте в слое ИМФ от диаметра проволоки. Видно, что максимальное напряжение растет вследствие усиления воздействия с увеличением диаметра проволоки. Распределение напряжений в ИМФ показывает, что значения, которые превышают допустимое напряжение, возникают не во всем слое, а исключительно по краям контакта КП с шариком и на краях пустот Киркендалла. Это свидетельствует о том, что отрыв проволоки от КП (рис. 3, *б*) происходит ввиду неоднородности структуры ИМФ и расположения пустот Киркендалла в ней. Испытание на отрыв приводит как к отрыву шарика от КП, так и к разрыву проволоки (рис. 3, *в*). Разрыв в большинстве случаев образуется не в месте зацепления, а в месте перехода проволоки в шарик (рис. 3, *г*). В стандартах [17, 18] для медной про-

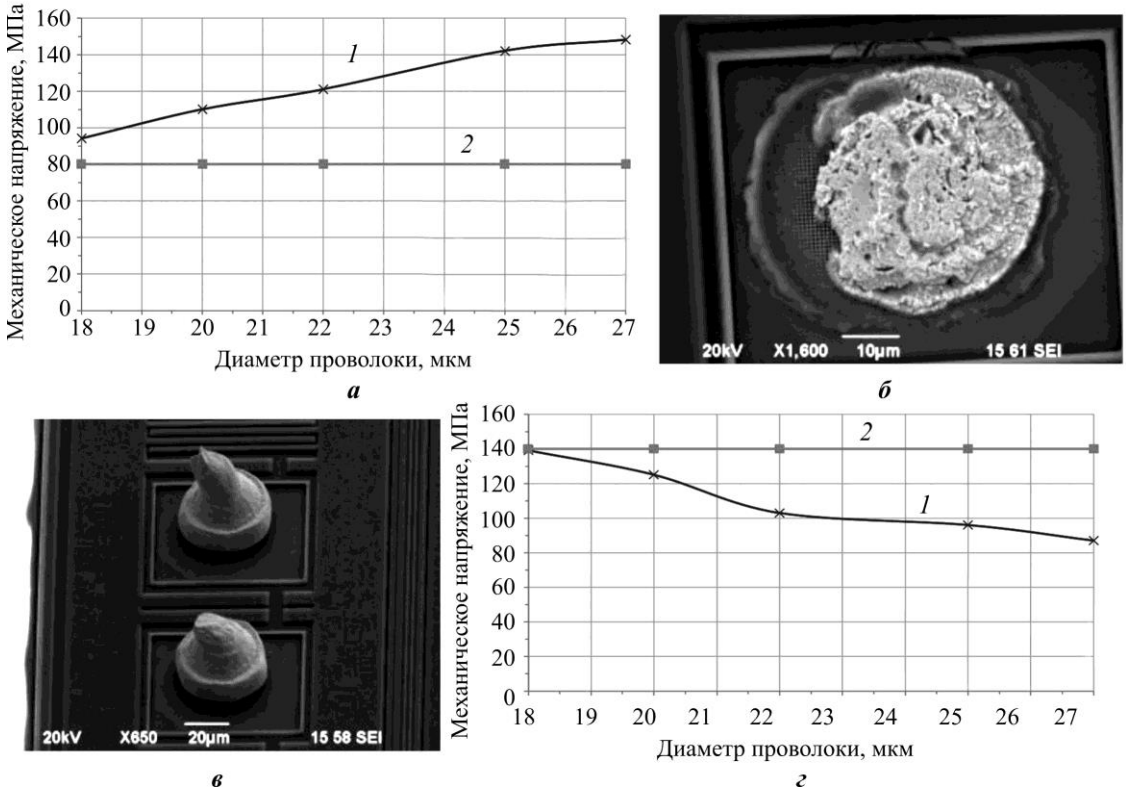


Рис. 3. Результаты исследования микросварного проволочного соединения Al-Au: *а* – зависимость максимальных механических напряжений в месте соединения шарика с КП от его диаметра; *б* – остаток ИМФ на КП после отрыва проволоки; *в* – дефект в месте перехода проволока – шарик после отрыва проволоки; *г* – зависимость максимальных напряжений в месте перехода проволока – шарик от диаметра проволоки: *1* – максимальное напряжение; *2* – предел

Fig. 3. Study results of the Al-Au microwelded wire bonding: *a* – dependence of maximum stresses at the ball – contact pad joint on the ball diameter; *b* – the remainder of the intermetallic phase on the contact pad after the wire bond pull test; *c* – defect at the wire – ball joint after the wire bond pull test; *d* – the dependence of maximum stresses at the wire – ball joint on the wire diameter: *1* – maximum stress; *2* – stress limit

волоки не рассматриваются предельные воздействия. В технических условиях на интегральные микросхемы установлено значение прочности внутренних сварных золотых проволочных соединений микросхем после герметизации, равное 0,035 Н. Результаты моделирования показывают, что золотая проволока чистотой 99,99 % выдерживает такую нагрузку, но в ИМС появляются разрушения, которые при длительном воздействии силы на отрыв могут привести к отрыву шарика от КП.

Для медной проволоки чистотой 99,99 % проводили моделирование с ИМФ Al_4Cu_9 и Al_2Cu толщиной 1,2 мкм без пустот. Зависимость максимально допустимой нагрузки от диаметра медной проволоки приведена на рис. 4, *а*. Возникающие максимальные механические напряжения сравнивали с пределом текучести меди, равным 90 МПа. Максимальные механические напряжения появляются в месте перехода проволоки в шарик и при диаметре 25 и 27 мкм становятся выше предела текучести по краям ИМФ Al_4Cu_9 и Al_2Cu (преимущественно). При моделировании на отрыв медная проволока не выдержала силы 0,035 Н в отличие от золотой. На рис. 4, *б* показана зависимость предельного воздействия на отрыв золотой и медной проволок от площади соприкосновения шарика с КП.

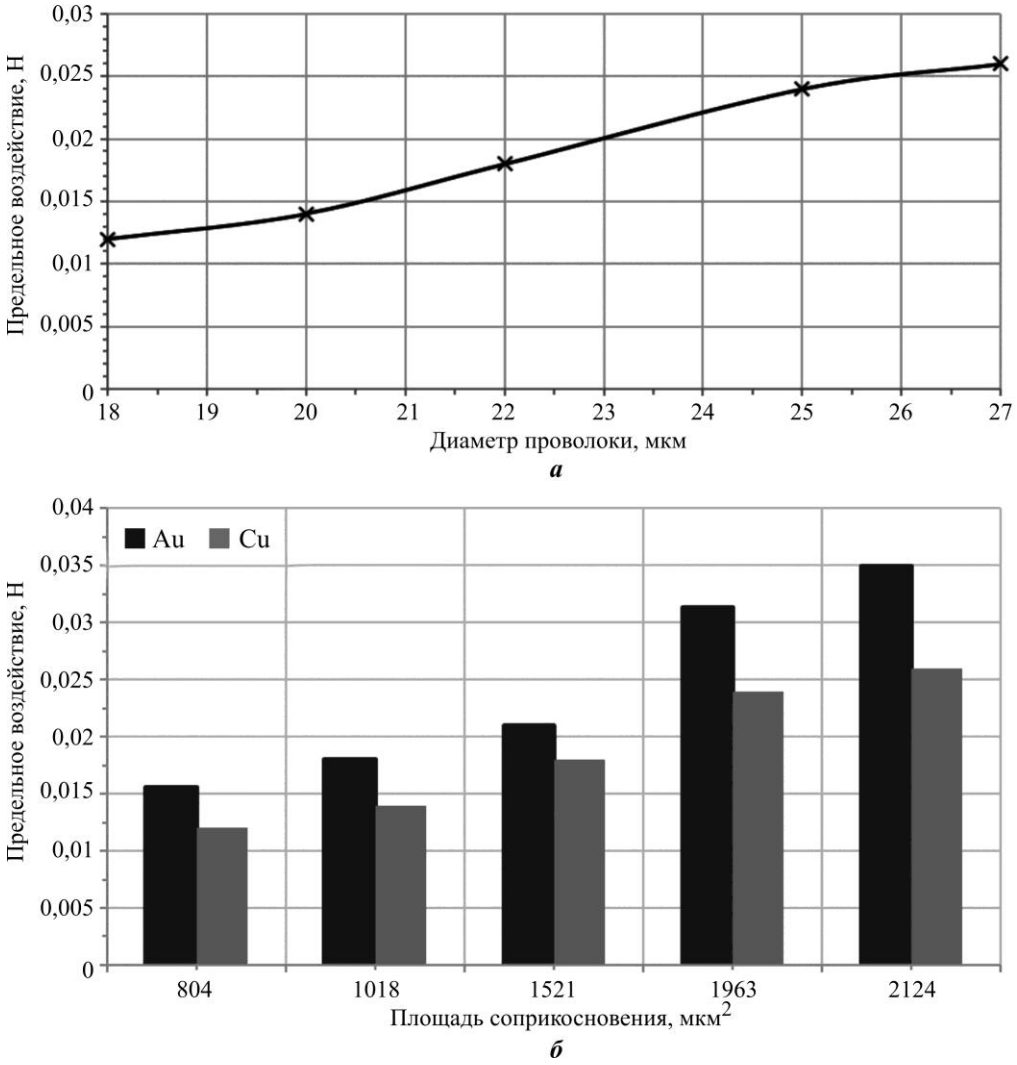


Рис. 4. Зависимости предельного воздействия на отрыв от диаметра медной проволоки (*а*) и от площади соприкосновения шарика с КП золотой и медной проволок (*б*)
Fig. 4. Dependence of the limiting effect on bond pull test on the diameter of the copper wire (*a*) and on the contact area of the ball with the contact pad of gold and copper wires (*b*)

Таким образом, с увеличением диаметра проволоки и, следовательно, площади соприкосновения шарика с КП растет предельная нагрузка на растяжение и смещается область возникновения максимальных механических напряжений с места соединения проволоки с шариком на края (для меди и золота) и пустоты (для золота) ИМС.

Моделирование воздействия электромеханических напряжений на микросварные проволочные соединения. Проведены расчеты сопротивления и максимального постоянного тока для проволочных ИМС Al-Au и Al-Cu с учетом требований ОСТ «Микросхемы интегральные». В таблице приведены заданные при моделировании электрические параметры проволоки. При моделировании воздействия электромеханических напряжений в золотой и медной проволоках, принимая во внимание влияние ИМФ $AlAu_4$, Al_2Cu, Al_4Cu_9, электрическая проводимость, коэффициент теплового расширения и теплоемкость для ИМФ заданы с учетом преобладания их в соединении по сравнению с алюминием [19].

Электрические параметры проволоки, заданные при моделировании
Electrical parameters of the wire specified during simulation

Диаметр проволоки, мкм	Сопротивление, Ом		Максимальный ток, А
	Au	Cu	
18	0,13	0,09	0,39
20	0,10	0,08	0,45
22	0,09	0,06	0,52
25	0,07	0,05	0,63
27	0,06	0,04	0,71

На нижних зафиксированных гранях КП устанавливали постоянную температуру 20 °С, на одной КП задавали постоянный ток, другую КП заземляли. Такие граничные условия приближенно равны измерению мультиметром сопротивления проволочного соединения реального кристалла в корпусе МК 5125.40-1.

В результате моделирования установлено, что максимальные электромеханические напряжения в системе Al-Au возникают по краям области шарикового контакта, особенно там, где расположены пустоты Киркендалла для моделей с диаметром проволоки 18–25 мкм и в соединении шарика с проволокой диаметром 27 мкм. Для обеих областей тока построены и аппроксимированы зависимости максимальных напряжений от силы тока (рис. 5, *а*, *б*).

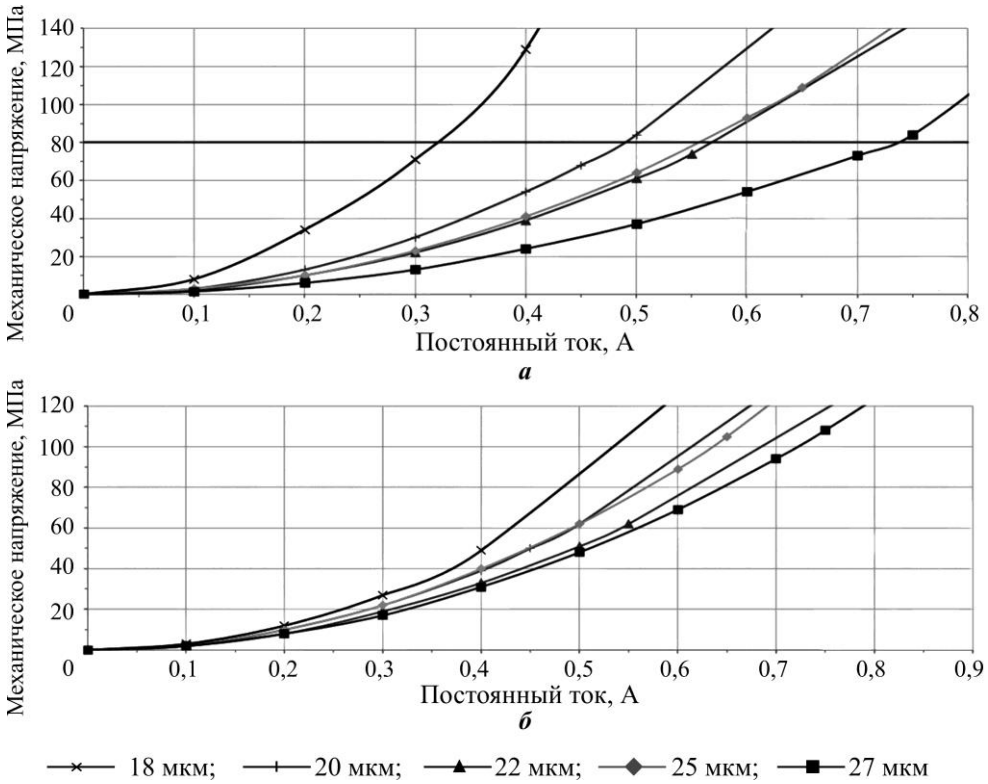


Рис. 5. Зависимости максимальных значений механических напряжений в слое ИМФ $AlAu_4$ (*а*) и в соединении шарика с проволокой в системе Al-Au (*б*) от силы тока при разном диаметре проволоки

Fig. 5. Dependences of maximum values of the mechanical stresses in $AlAu_4$ intermetallic phase layer (*a*) and in the ball – wire joint in the Al-Au system (*b*) on current with different wire diameters

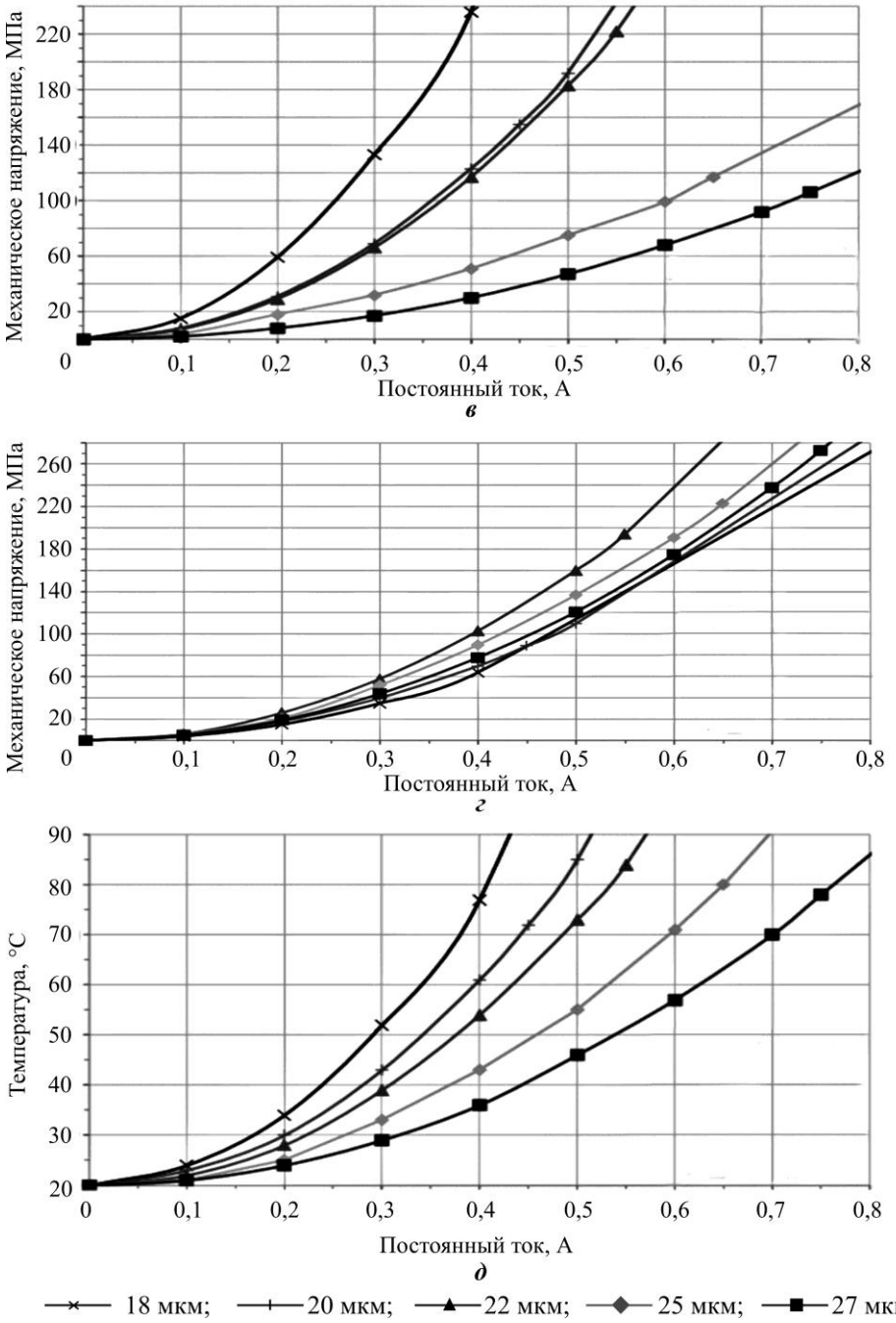


Рис. 5. Зависимости максимальных значений механических напряжений в слоях ИМФ Al_2Cu и Al_4Cu_9 (*в*), в соединении шарика с медной проволокой (*г*) и температуры в системе Al-Au (*д*) от силы тока при разном диаметре проволоки

Fig. 5. Dependences of maximum values of the mechanical stresses in Al_2Cu and Al_4Cu_9 intermetallic phase layers (*c*), in the ball – copper wire joint (*d*) and temperatures in the Al-Au system (*e*) on current with different wire diameters

Из рис. 5, *а* видно, что в проволочных соединениях диаметром 18 и 25 мкм с допустимым током 0,39 и 0,63 А соответственно максимальные механические напряжения немного превышают 80 МПа, т. е. появляются незначительные разрушения в ИМС $AlAu_4$. Учтены нагрузки вследствие тепла, выделяемого при протекании электрического тока. На рис. 5, *д* приведена зависимость температуры нагрева золотых проволочных

соединений с разным диаметром от протекающего тока. Наибольшая температура (140 °C) зафиксирована для золотого проволочного соединения диаметром 18 мкм при допустимом токе 0,39 А.

Максимальные механические напряжения в системе Al-Cu возникают по краям области шарикового контакта для моделей с диметром проволоки 18–22 мкм и в соединении шарика с проволокой диаметром 25 и 27 мкм. Для обеих областей построены и аппроксимированы зависимости максимальных напряжений от силы тока (рис. 5, *в*, *г*). Из графиков видно, что максимальные механические напряжения превышают предел текучести меди, равный 90 МПа, при больших токовых нагрузках по сравнению с золотыми проводниками, что может привести к обрыву электрической цепи.

Заключение. При моделировании воздействия постоянного тока и на отрыв надежнее проявила себя проволока диаметром 27 мкм (в последнем случае – с большей площадью соприкосновения шарика с КП). По сравнению с золотой проволокой медная нагревается меньше, так как характеризуется лучшей теплопроводностью, но имеет бóльшие механические напряжения при тех же токовых нагрузках.

Внешний вид сварных соединений и характер разрушения при оценке прочности на обрыв на исследуемых образцах структур Au-Al и Cu-Al показали, что для разварки предпочтительнее золотая проволока или ее сплавы, однако образование ИМС с алюминиевой КП занимает мало времени, что ведет к быстрой деградации и преждевременному отказу устройства. При температуре выше 150 °C рост ИМС многократно ускоряется, что делает золотую проволоку непригодной для использования.

Результаты моделирования показали, что сварное соединение имеет очевидное скопление электрических зарядов на входе, значительно усиливающее эффект электромиграции. На основе метода расхождения атомного потока можно эффективно предсказать образование пустот сварных соединений и прогноз срока службы будет более точным. Экспериментальные результаты демонстрируют, что сопротивление последовательной цепи значительно увеличивается вследствие образования пустот и коррозией выводов. Более того, рост ИМС может быть, очевидно, усилен под действием тока.

Таким образом, установлено, что использование проволоки большого диаметра (> 25 мкм), несмотря на увеличение прочности на разрыв, приводит к смещению пиковых механических напряжений на края контактной площадки и образованию дефектов, снижающих долговременную надежность. В связи с этим для микросхем с повышенной плотностью монтажа рекомендуется использовать проволоку малого диаметра (≤ 25 мкм). Ключевой задачей технологического процесса при этом становится обеспечение надежного соединения при малой площади контакта. Поддержание постоянных характеристик используемых проволок от партии к партии сведет к минимуму необходимость корректировки параметров процесса сварки проволокой и будет способствовать достижению надежного процесса сварки проволокой. Более стабильного результата и прочности микросварных соединений можно добиться при использовании легированной микропроволоки, что замедлит рост ИМС и увеличит надежность и срок эксплуатации микросхем.

Литература / References

1. Ланин В. Л., Нгуен Ж. В. Термозвуковая микросварка проволочных выводов интегральных схем. In: *BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and advanced analytics:* сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 11-12 мая 2022). Минск: Бестпринт; 2022, с. 115–119. EDN: EGHPRV.
Lanin V. L., Nguyen G. V. Thermosonic microwelding of integrated circuit wire leads. In: *BIG DATA i analiz vysokogo urovnya = BIG DATA and advanced analytics:* collection of writings of the 8th International res.-to-pract. conf. (Minsk, May 11-12, 2022). Minsk: Bestprint Publ.; 2022, pp. 115–119. (In Russ.).

2. Pelzer R., Woehlert S., Koerner H., Khatibi G., Walter J. Growth behavior and physical response of Al-Cu intermetallic compounds. In: *2014 IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*. Singapore: IEEE; 2014, pp. 372–377. https://doi.org/10.1109/EPTC.2014.7028259
3. Cao F., Zhang P., Zou J., Wang T. The formation and growth of intermetallic compounds during interdiffusion of Al/Cu bimetals. *Mater. Res. Express.* 2022;9(5):056503. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac69b4
4. Vertyanov D. V., Belyakov I. A., Timoshenkov S. P., Borisova A. V., Sidorenko V. N. Effects of gold-aluminum intermetallic compounds on chip wire bonding interconnections reliability. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg; Moscow: IEEE; 2020, pp. 2216–2220. https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039518
5. Karpel A., Gur G., Atzmon Z., Kaplan W. D. Microstructural evolution of gold–aluminum wire-bonds. *J. Mater. Sci.* 2007;42(7):2347–2357. https://doi.org/10.1007/s10853-007-1593-y
6. Ulrich C. M., Hashibon A., Svoboda J., Elsässer C., Helm D., Riedel H. Diffusion kinetics in aluminium–gold bond contacts from first-principles density functional calculations. *Acta Materialia.* 2011;59(20):7634–7644. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.08.021
7. Wang C., Chen J., Liang S., Shao W. First-principles calculations to investigate pressure effect on structural, elastic and thermodynamic properties of AlCu, Al_2Cu and Al_4Cu_9. *Vacuum.* 2022;203:111279. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111279
8. Дротенко В. Д., Соловьев И. А., Вертянов Д. В., Калугин В. В. Анализ дефектов микросварного соединения золото-алюминий в корпусах микросхем. *Тенденции развития науки и образования.* 2023;(99-7):181–184. https://doi.org/10.18411/trnio-07-2023-412. EDN: FKZIRE.
Drotenko V. D., Solov'ev I. A., Vertyanov D. V., Kalugin V. V. Analysis of defects in the micro-welded gold-aluminum bonding in microcircuit packages. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2023;(99-7):181–184. (In Russ.). https://doi.org/10.18411/trnio-07-2023-412
9. Zhou H., Zhang Y., Cao J., Su Ch., Li C., Chang A., An B. Research progress on bonding wire for microelectronic packaging. *Micromachines.* 2023;14(2):432. https://doi.org/10.3390/mi14020432
10. Xu H., Liu C., Silberschmidt V. V., Pramana S. S., White T. J., Chen Z. A re-examination of the mechanism of thermosonic copper ball bonding on aluminium metallization pads. *Scr. Mater.* 2009;61(2):165–168. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.03.034
11. Lim A. B. Y., Long X., Shen L., Chen X., Ramanujan R. V., Gan C. L., Chen Z. Effect of palladium on the mechanical properties of Cu–Al intermetallic compounds. *J. Alloys Compd.* 2015;628:107–112. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.119
12. Lall P., Zhang Y., Jung S. Corrosion kinetics investigation on Cu-Al alloy in sulfate environment under various temperature and pH values. In: *2023 22nd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. Orlando, FL: IEEE; 2023, pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/ITherm55368.2023.10177631
13. Иванов В. Специфика технологии термозвуковой сварки медной проволокой выводов микросхем, компонентов и силовых элементов. *Технологии в электронной промышленности*. 2021;(2):60–65. EDN: ZMPXAI.
Ivanov V. Specificity of the technology of thermosonic welding with copper wire of microcircuit leads, components and power elements. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti.* 2021;(2):60–65. (In Russ.).
14. Ланин В. Л., Петухов И., Передков Н. Контроль качества микросварных соединений. *Технологии в электронной промышленности.* 2021;(2):66–69. EDN: DHSTDI.
Lanin V. L., Petukhov I., Peredkov N. Quality control of microwelded joints. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti.* 2021;(2): 66–69. (In Russ.).
15. Chen W.-H., Cheng H.-C., Yu C.-F. The mechanical, thermodynamic, and electronic properties of cubic Au_4Al crystal via first-principles calculations. *J. Alloys Compd.* 2016;689:857–864. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.050
16. Chen H., Yang L., Long J. First-principles investigation of the elastic, Vickers hardness and thermodynamic properties of Al–Cu intermetallic compounds. *Superlattices and Microstructures*. 2015;79:156–165. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.11.005
17. MIL-STD-883G. Method 2023.5: Nondestructive bond pull. *Q-Tech Corporation.* 19.08.1994. Available at: https://q-tech.com/wp-content/uploads/STD-883-2023.pdf (accessed: 20.08.2025).
18. *ГОСТ 10446–80. Проволока. Метод испытания на растяжение = Wire. Tensile test method*. М.: Гос. комитет СССР по стандартам; 1987. 6 с.
GOST 10446–80. Provoloka. Metod ispytaniya na rastyazhenie = Wire. Tensile test method. Moscow: Gos. komitet SSSR po standartam Publ.; 1987. 6 p. (In Russ.).

19. Kim H.-J., Lee J. Y., Paik K.-W., Koh K.-W., Won J., Choe S. Effects of Cu/Al intermetallic compound (IMC) on copper wire and aluminum pad bondability. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 2003;26(2):367–374. https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.815121

Информация об авторах

Титов Андрей Юрьевич – старший преподаватель Института нано- и микросистемной техники, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D микросистем» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kisrpi@mail.ru

Вертянов Денис Васильевич – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники, начальник научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D микросистем» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vdv.vertyanov@yandex.ru

Артюшин Денис Игоревич – главный технолог АО «НИИМА «Прогресс» (Россия, 124498, г. Москва, пр-д Черепановых, 54), d.artyushin@i-progress.tech

Коровина Анна Юрьевна – руководитель проекта АО «НИИМА «Прогресс» (Россия, 124498, г. Москва, пр-д Черепановых, 54), a.korovina@i-progress.tech

Коробова Наталья Егоровна – доктор химических наук, профессор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), korobova3@mail.ru

Рабцевич Вадим Александрович – инженер-конструктор научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D микросистем», студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), fuze122112@gmail.com

Гладкова Светлана Игоревна – инженер-конструктор научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D микросистем», студентка Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gladkova2002@mail.ru

Information about the authors

Andrey Yu. Titov – Senior Lecturer of the Institute of Nano- and Microsystems Engineering, Leading Engineer of the Research Laboratory “Advanced Technologies of 3D Microsystems Packaging and Production”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kisrpi@mail.ru

Denis V. Vertyanov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystems Engineering, Head of the Research Laboratory “Advanced Technologies of 3D Microsystems Packaging and Production”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vdv.miet.soyuz@yandex.ru

Denis I. Artyushin – Chief Technologist, JSC NIIMA Progress (Russia, 124498, Moscow, Cherepanov dr., 54), artushin@mri-progress.ru

Anna Yu. Korovina – Project Manager, JSC NIIMA Progress (Russia, 124498, Moscow, Cherepanov dr., 54), a.korovina@i-progress.tech

Natalya E. Korobova – Dr. Sci. (Chem.), Prof. of the Institute of Nano- and Microsystems Engineering, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), korobova3@mail.ru

Vadim A. Rabtsevich – Design Engineer of the Research Laboratory "Advanced Technologies of 3D Microsystems Packaging and Production", Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), fuze122112@gmail.com

Svetlana I. Gladkova – Design Engineer of the Research Laboratory "Advanced Technologies of 3D Microsystems Packaging and Production", Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gladkova2002@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 30.10.2024
Поступила после рецензирования / Revised 09.12.2024
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

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): https://www.ural-press.ru/catalog
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- **через Агентство** «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- **ООО «Руспресса»**: http://abcpress.ru/
- **ООО «ГЛОБАЛПРЕСС»**: globalpress.ms@mail.ru
- **подписное агентство** «Криэйтив Сервис Бэнд»: https://periodicals.ru/
- **редакцию** – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

Научная статья
УДК 620.187.3:548.4
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-707-720
EDN: TJJEEC

Характеризация наноразмерных слоев гетерокомпозиций с применением цифровой обработки данных просвечивающей электронной микроскопии

Р. Л. Волков*, Г. С. Киреев, О. В. Подорожний, А. Р. Решетняк, А. В. Аникин, Н. И. Боргардт

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

* *r.l.volkov@org.miet.ru*

Аннотация. Современная просвечивающая электронная микроскопия позволяет проводить всесторонние исследования структуры и определять состав слоев различных гетерокомпозиций. Применение просвечивающей электронной микроскопии для характеризации слоев наноразмерной толщины требует разработки количественных методов анализа электронно-микроскопических данных. В работе методами анализа электронно-микроскопических данных исследованы слои фазосдвигающего фотошаблона, который используется в операциях литографии в микроэлектронике. Определено, что в образцах поперечного сечения на поверхности подложки SiO_2 расположены слои $Mo_{0,03}Si_{0,36}N_{0,61}$, $Cr_{0,49}C_{0,03}N_{0,48}$ и $Cr_{0,38}C_{0,05}N_{0,28}O_{0,29}$. Установлено, что количественный анализ одномерных профилей интенсивности, вычисленных путем усреднения ее распределения на электронно-микроскопических изображениях вдоль подложки, обеспечивает прецизионное измерение толщины слоев гетерокомпозиции, которая составила (69,91 ± 0,12) нм для молибденсодержащего слоя, (26,42 ± 0,17) нм и (20,00 ± 0,20) нм для хромсодержащих слоев. Анализ высокоразрешающих электронно-микроскопических микрофотографий и электронограмм, полученных от образцов планарного сечения, показал, что молибденсодержащий слой $Mo_{0,03}Si_{0,36}N_{0,61}$ является аморфным, а хромсодержащие слои $Cr_{0,49}C_{0,03}N_{0,48}$ и $Cr_{0,38}C_{0,05}N_{0,28}O_{0,29}$ имеют поликристаллическую структуру и образованы кристаллитами с кубической решеткой с параметрами 0,406 и 0,408 нм соответственно. В результате цифровой обработки изображений выявлено, что в слоях $Cr_{0,49}C_{0,03}N_{0,48}$ и $Cr_{0,38}C_{0,05}N_{0,28}O_{0,29}$ средние латеральные размеры кристаллитов близки к значениям 6,7 и 7,4 нм, средние размеры пор приблизительно равны 1,7 и 2,5 нм, а их пористость составляет 6,4 и 16,6 % соответственно. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенных методов количественной оценки толщины и пористости слоев фотошаблона и могут применяться при электронно-микроскопических исследованиях различных гетерокомпозиций с наноразмерными слоями.

Ключевые слова: наноструктуры, просвечивающая электронная микроскопия, микродифракция электронов, фокусированный ионный пучок, цифровая обработка изображений

© Р. Л. Волков, Г. С. Киреев, О. В. Подорожний, А. Р. Решетняк, А. В. Аникин, Н. И. Боргардт, 2025

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2024-0004) с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов».

Для цитирования: Волков Р. Л., Киреев Г. С., Подорожний О. В., Решетняк А. Р., Аникин А. В., Боргардт Н. И. Характеризация наноразмерных слоев гетерокомпозиций с применением цифровой обработки данных просвечивающей электронной микроскопии. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):707–720. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-707-720. EDN: TJJEEC.

Original article

Heterocompositions nanoscale layers characterization using digital processing of transmission electron microscopy data

R. L. Volkov*, G. S. Kireev, O. V. Podorozhniy, A. R. Reshetnyak, A. V. Anikin, N. I. Borgardt

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

** r.l.volkov@org.miet.ru*

Abstract. Modern transmission electron microscopy permits comprehensive studies of the structure and determination of the composition of various multilayer heterocompositions. Transmission electron microscopy use for characterization of nanoscale layers requires the development and application of quantitative methods for analyzing electron microscopic data. In this work, electron microscopic data analysis methods were employed to study the layers of a phase-shifting photomask used in lithography operations in microelectronics. It was determined that the $Mo_{0.03}Si_{0.36}N_{0.61}$, $Cr_{0.49}C_{0.03}N_{0.48}$ and $Cr_{0.38}C_{0.05}N_{0.28}O_{0.29}$ layers are located in cross-sectional samples on the surface of the SiO_2 substrate. It has been established that quantitative analysis of one-dimensional intensity profiles calculated by averaging its distribution in electron microscopic images along the substrate provides a precise measurement of the heterocomposition layers' thicknesses, which were (69.91 ± 0.12) nm for the molybdenum-containing layer, (26.42 ± 0.17) nm and (20.00 ± 0.20) nm for the chromium-containing layers. An analysis of high-resolution electron micrographs and electron diffraction patterns obtained for planar-view sample has shown that the molybdenum-containing layer $Mo_{0.03}Si_{0.36}N_{0.61}$ is amorphous, while the $Cr_{0.49}C_{0.03}N_{0.48}$ and $Cr_{0.38}C_{0.05}N_{0.28}O_{0.29}$ chromium-containing layers have a polycrystalline structure with cubic crystal lattice with parameters of 0.406 and 0.408 nm, respectively. It was found using digital image processing that in the $Cr_{0.49}C_{0.03}N_{0.48}$ and $Cr_{0.38}C_{0.05}N_{0.28}O_{0.29}$ layers, the average lateral sizes of crystallites are close to 6.7 and 7.4 nm, the average pore sizes are approximately 1.7 and 2.5 nm, and their porosity values are 6.4 and 16.6 %. The obtained results demonstrate the effectiveness of the proposed methods for quantitative estimation of the photomask layers thickness and porosity, and can be used in electron microscopic studies of various heterocompositions with nanoscale layers.

Keywords: nanostructures, transmission electron microscopy, electron microdiffraction, focused ion beam, digital image processing

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement FSMR-2024-004) and carried out using the equipment of the Resource Sharing Center “Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects”.

For citation: Volkov R. L., Kireev G. S., Podorozhniy O. V., Reshetnyak A. R., Anikin A. V., Borgardt N. I. Heterocompositions nanoscale layers characterization using digital processing of transmission electron microscopy data. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):707–720. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-707-720.

Введение. Гетерокомпозиции, которые образованы наноразмерными слоями, осажденными на поверхность подложки [1–4], являются одними из наиболее востребованных в науке и промышленности. По сравнению с объемными материалами такие гетерокомпозиции имеют уникальные свойства, а технологии их получения обеспечивают гибкое управление их структурой, составом и физическими характеристиками [5–7]. Существует возможность осаждения многослойных поверхностных наноструктур и формирования из равномерного слоя трехмерной структуры по заданной схеме, например, с помощью литографии [8].

Разнообразие свойств, которыми в зависимости от условий изготовления может обладать многослойная нанокомпозиция, требует контроля ее структуры и состава с применением современных прецизионных методов исследования: рентгеновской и электронной дифракции на отражение [9, 10], рентгеновского энергодисперсионного микроанализа [11], вторичной ионной масс-спектроскопии [12] и др. Толщина слоев может определяться с применением растровой электронной микроскопии [11] и эллипсометрии [13].

Один из наиболее комплексных и информативных методов анализа слоев гетерокомпозиций – просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) [14], позволяющая с использованием образцов поперечного и планарного сечений непосредственно визуализировать и измерять толщину слоев гетерокомпозиций, изучать структуру и определять их состав. Дополнительные исследования тонкой фольги планарного сечения дают возможность получать данные об атомарном строении слоев, идентифицировать фазы образующих их материалов [15].

В настоящей работе просвечивающая электронная микроскопия применяется для всесторонней характеризации слоев фазосдвигающего фотошаблона, представляющего собой многослойную гетерокомпозицию. Методы цифровой обработки полученных данных позволили прецизионно измерить толщину слоев, оценить размеры кристаллитов и пор в хромсодержащих слоях фотошаблона и определить их пористость. Полученная детальная информация о слоях фотошаблона необходима для разработки технологических процессов их создания, контроля качества, а также анализа их деградации в процессе эксплуатации.

Методы приготовления и исследования электронно-микроскопических образцов. Для препарирования электронно-микроскопических образцов применяли электронно-ионный микроскоп FEI Helios NanoLab 650 (Нидерланды), оснащенный газовым инжектором для локального осаждения тонкого слоя, который содержит платину и аморфный углерод (Pt + *a*-C), и микроманипулятором Kleindiek MM3A-EM. Перед приготовлением образцов на поверхность фотошаблона последовательно осаждали тонкие слои аморфного углерода (*a*-C) и хрома (Cr) толщиной примерно 30 нм в установке магнетронного напыления Cressington 208HR. Слой *a*-C формировали для повышения контрастности поверхности фотошаблона на электронно-микроскопических изображениях и уменьшения абсорбции характеристического рентгеновского излучения при определении

состава материала, а слой Cr – для заземления образца и исключения накопления электрического заряда на нем в процессе приготовления в электронно-ионном микроскопе.

Образцы поперечного сечения приготавливали стандартным методом *in situ lift-out* [16]. Тонкую фольгу вырезали из объемного материала фокусированным ионным пучком при ускоряющем напряжении 30 кВ и с помощью иглы микроманипулятора переносили на специально подготовленную медную сетку-держатель. Дальнейшее утонение образца выполняли при скользящих углах падения пучка ионов с поэтапным снижением ускоряющего напряжения до 5, 2 и 1 кВ.

Образцы планарного сечения, наклоненного на угол 2° относительно поверхности многослойной гетерокомпозиции, приготавливали методом фокусированного ионного пучка [15]. Приготовленную таким образом тонкую фольгу применяли для исследования наноразмерных слоев гетерокомпозиции независимо друг от друга при ее нормальном освещении в просвечивающем электронном микроскопе.

Образцы поперечного сечения изучали в просвечивающем электронном микроскопе FEI Titan Themis 200 (Нидерланды), оснащенном корректором аберраций объективной системы линз, камерой Ceta-16M, энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения Super-X и кольцевым детектором электронов, рассеянных на большие углы. Исследования выполняли методами просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ), высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ), микродифракции электронов и рентгеновского микроанализа при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Электронно-микроскопические данные обрабатывали с применением стандартного программного обеспечения. Комплекс программ Velox [17] применяли для обработки двумерных карт и профилей распределения концентраций атомов химических элементов, а также для определения состава слоев изучаемой гетерокомпозиции. Средства компьютерных пакетов Matlab [18] и ImageJ [19] использовали для измерения толщины слоев, оценки их пористости и размеров входящих в них кристаллитов. В программных приложениях Digital Micrograph [20–22] и Fityk [23] выполняли обработку и анализ дифракционных картин.

Исследование тонкой фольги поперечного сечения. На рис. 1, *а* представлена ПРЭМ-микрофотография образца поперечного сечения, визуализирующая нанометровые слои фазосдвигающего фотошаблона. На рис. 1, *б* показаны профили концентраций атомов химических элементов, которые вычислены путем усреднения вдоль поверхности подложки двумерных карт распределения углерода, азота, кислорода, кремния, хрома и молибдена, полученных методом рентгеновского микроанализа. Сопоставление рис. 1, *а* и 1, *б* позволяет установить, что на подложке SiO_2 (I) расположены молибденсодержащий слой $Mo_{0,03}Si_{0,36}N_{0,61}$ (II), два хромсодержащих слоя $Cr_{0,49}C_{0,03}N_{0,48}$ (III) и $Cr_{0,38}C_{0,05}N_{0,28}O_{0,29}$ (IV), а также защитный слой *a*-C (V), осажденный при приготовлении электронно-микроскопического образца.

На ПРЭМ-микрофотографии (см. рис. 1, *а*) слои с высокой концентрацией атомов тяжелых элементов светлые, поскольку электроны, формирующие их изображения, имеют более высокую интенсивность вследствие Z-контраста [14]. Равномерное распределение интенсивности в слое II указывает на его однородность как в латеральном, так и горизонтальном направлениях. Вертикальные области пониженной интенсивности (слои III и IV) свидетельствуют о пористой структуре слоев. Постепенное уменьшение интенсивности вдоль оси *y* в слое IV, снижение концентрации хрома и увеличение концентрации кислорода (рис. 1, *б*) указывают на возрастание его пористости в направлении к поверхности фотошаблона. Из профиля концентрации атомов кислорода (см. рис. 1, *б*) видно, что содержание кислорода увеличивается на границе между слоями II и III.

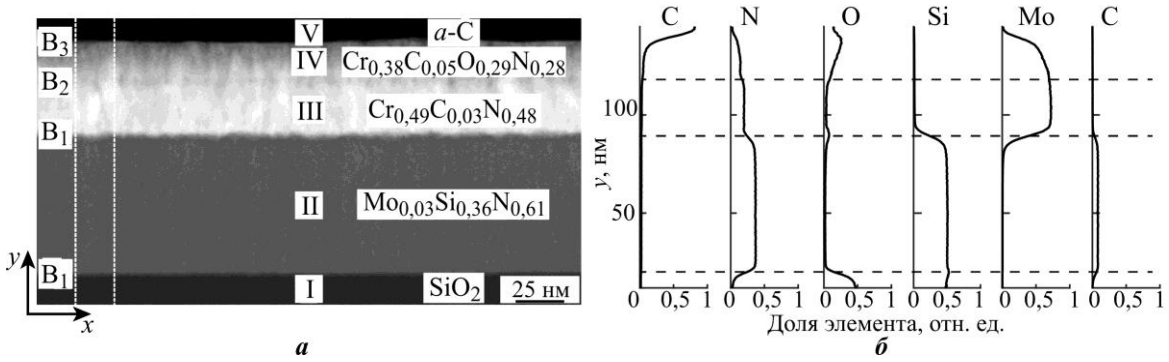


Рис. 1. ПРЭМ-микрофотография образца поперечного сечения с сегментами шириной около 20 нм, выделенными вертикальными точечными линиями (*а*), и профили распределения концентраций химических элементов в ее слоях (*б*)

Fig. 1. STEM micrograph of the specimen cross-section (*a*) with segments about 20 nm wide, highlighted by vertical dotted lines, and chemical elements concentration distribution profiles in the *y* direction perpendicular to the surface (*b*)

Соседние слои в парах I и II, II и III, IV и V существенно различаются по доле атомов тяжелых элементов, что приводит к большой разнице средней интенсивности на их изображениях и четким границам между ними. Для слоев III и IV средние значения интенсивности приблизительно равны, так как они содержат примерно равные доли атомов тяжелых элементов. Вследствие этого граница между этими слоями малозаметна и визуализируется как область со слегка пониженной интенсивностью.

Прецизионное измерение толщины слоев. Поскольку толщина в первую очередь пористых слоев III и IV варьируется вдоль поверхности гетерокомпозиции, для нахождения среднего значения толщины ПРЭМ-микрофотографию разделяли на 20 сегментов шириной около 20 нм, первые два из которых на рис. 1, *а* выделены вертикальными точечными линиями. Для каждого сегмента вычисляли усредненный вдоль оси *x* профиль интенсивности $I_{im}(y)$, один из которых показан на рис. 2, *а*. На нем парами близко расположенных вертикальных точечных линий отмечены переходные области (ПО) в окрестностях границ между слоями, имеющие протяженность около 10 нм. Характер изменений интенсивности в пределах ПО определяли согласно составу и пористости соседних слоев, поэтому все межслойные границы классифицировали на три типа: B_1, B_2 и B_3 (см. рис. 1 и 2).

Границы 1-го типа (B_1) образуются между слоями I и II, II и III, для которых концентрации атомов тяжелых элементов существенно различаются и изменения интенсивности $I_{im}(y)$ в пределах ПО имеют ступенчатый вид. Для определения координаты границы ширину ПО выбирали так, чтобы в нее частично попадали горизонтальные участки профиля интенсивности, относящиеся к прилегающим слоям (рис. 2, *б*). В пределах ПО профиль интенсивности $I_{im}(y)$ аппроксимировался ступенчатой функцией $I_1(y) = a + b\left[1 \pm \operatorname{erf}\dfrac{y-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right]$, оптимальные значения параметров *a*, *b*, μ и σ которой вычисляли методом наименьших квадратов. Параметр μ определяет координату границы y_1 между слоями (см. рис. 2).

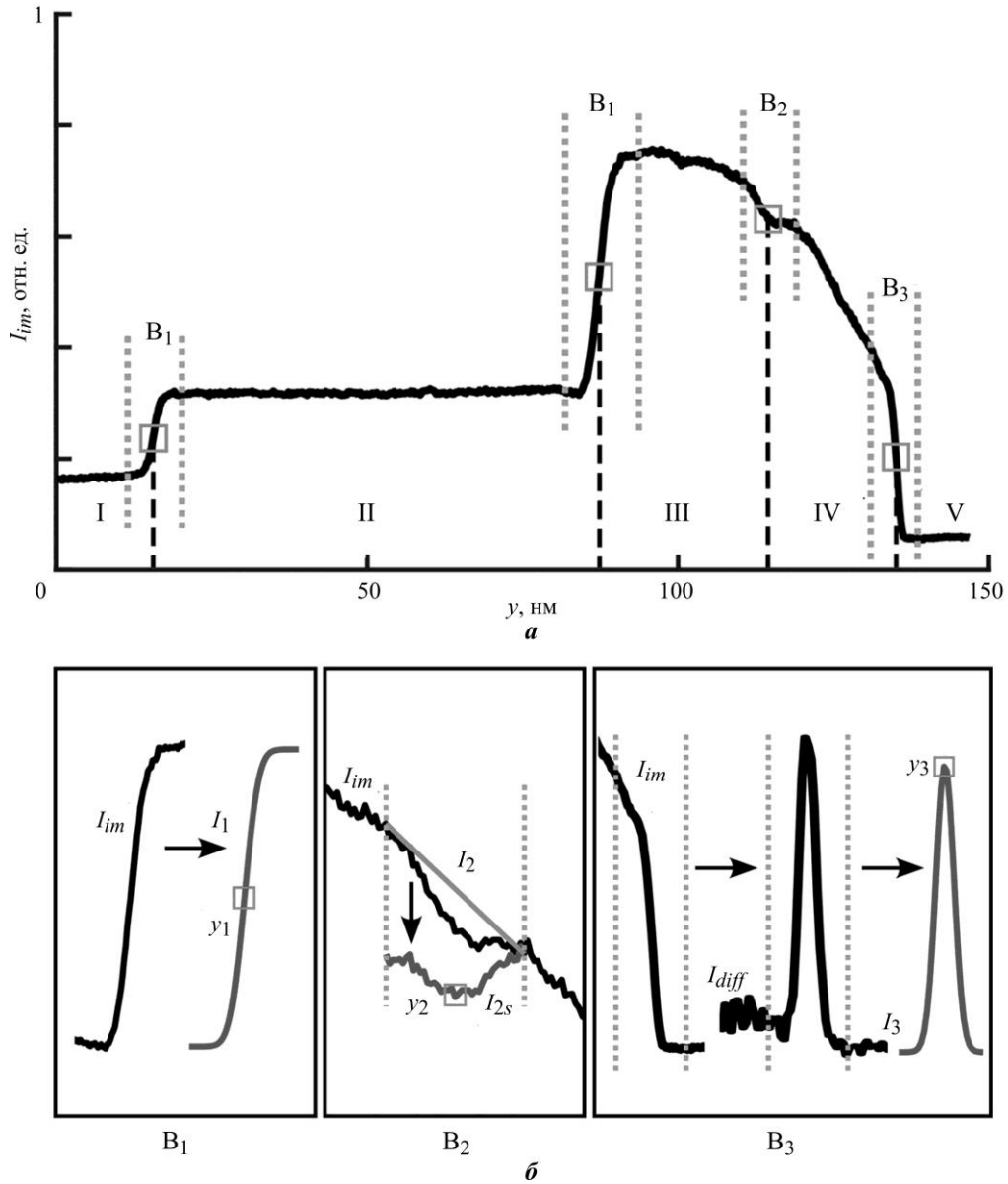


Рис. 2. Усредненный профиль интенсивности (*а*) и схематическая иллюстрация процедуры определения координат межслойных границ B_1, B_2 и B_3 (*б*): □ – координата границы y_1 между слоями

Fig. 2. Averaged intensity profile (*a*) and schematic illustration of the procedure for determining the coordinates of interlayer boundaries B_1, B_2 and B_3 (*b*): □ – coordinate of the boundary y_1 between layers

Граница 2-го типа (B_2) образуется между пористыми слоями III и IV, в которых концентрации атомов тяжелых элементов близкие по значениям. Профиль интенсивности $I_{im}(y)$ вблизи границы между ними имеет характерный перегиб (см. рис. 2, *а*). Границы ПО выбирали на некотором удалении от области перегиба, и с использованием значений $I_{im}(y)$ на левой и правой границах ПО строили вспомогательный отрезок прямой линии $I_2(y)$, как показано на рис. 2, *б*. Затем вычисляли функцию разности интенсивностей ($I_{2s} = I_{im} - I_2$), график зависимости которой на рис. 2, *в* смещен вверх для

наглядности, и находили координату y_2, соответствующую ее минимальному значению и определяющую положение границы между слоями III и IV.

Граница 3-го типа (B_3) возникает между слоями IV и V, в которых концентрации атомов тяжелых элементов существенно отличаются друг от друга. Однако вследствие постепенного уменьшения интенсивности на изображении слоя IV в направлении к поверхности гетерокомпозиции, обусловленного его увеличивающейся пористостью, изменения интенсивности в пределах ПО не имеют выраженного ступенчатого вида. По этой причине для определения положения границы между слоями IV и V использовали градиентное изображение, которое вычисляли на основе исходной ПРЭМ-микрофотографии. После разбиения его на сегменты, как и в случае с исходной микрофотографией, строили усредненные профили значений численной производной $I_{diff}(y)$. Фрагменты $I_{im}(y)$ и соответствующий ему профиль $I_{diff}(y)$, имеющий вид пика в области границы 3-го типа, показаны на рис. 2, *б*. Ширину ПО определяли по левой и правой границам пика, после чего в ее пределах из значений $I_{diff}(y)$ вычитали уровень фона. Полученный профиль с применением метода наименьших квадратов аппроксимировали функцией Гаусса, положение центра которой соответствует координате границы y_3 между слоями IV и V.

Описанная процедура определения положений межслойных границ реализована в виде компьютерной программы, разработанной в среде Matlab, и применена ко всем 20 сегментам изображения. Для каждого из них толщину поверхностных слоев вычисляли как разность координат их верхних и нижних границ. Результаты измерения обрабатывали статистическими методами в соответствии с ГОСТ [24]. Средние толщины слоев II, III и IV составили (69,91 ± 0,12) нм, (26,42 ± 0,17) нм и (20,00 ± 0,20) нм соответственно. Полученные данные свидетельствуют о сравнительно невысоком разбросе толщин слоев гетерокомпозиции, а также о наибольшей равномерности толщины молибденсодержащего слоя II.

Исследование тонкой фольги планарного сечения. На рис. 3, *а–в* показаны ПРЭМ-изображения слоев, которые получены с помощью образца, приготовленного в сечении, почти параллельном поверхности гетерокомпозиции. Из рис. 3, *а* видно, что молибденсодержащий слой II неоднороден по составу и состоит из ячеек размером от 5 до 15 нм, внутри которых концентрация Mo понижена (темные участки А), а на границах между ними она повышена (светлые участки Б). Выявленные ячейки, по-видимому, представляют собой сечения плоскостью образца вертикальных столбиков, проходящих через весь слой II.

На рис. 3, *б, в* приведены ПРЭМ-изображения слоев III и IV соответственно. На них видны участки с относительно низкой и средней интенсивностью, соответствующие порам (В) и материалу слоя, в котором в виде светлых областей с высокой интенсивностью выявляются кристаллиты, ориентированные в точное отражающее положение (Г). Из сравнения приведенных микрофотографий следует, что в слое III имеется малое количество пор по сравнению со слоем IV, пористость которого заметно больше.

На рис. 3, *г–ж* показаны ВРЭМ-изображения подложки фотошаблона, изготовленной из кварцевого стекла (I), молибден- (II) и хромсодержащих (III и IV) слоев. Отсутствие упорядоченных осцилляций интенсивности на изображениях на рис. 3, *г, д* свидетельствует об аморфной структуре материала подложки I и слоя II. Из рис. 3, *е, ж* видно, что хромсодержащие слои III и IV являются поликристаллическими и состоят из кристаллитов с высокой степенью совершенства кристаллической структуры.

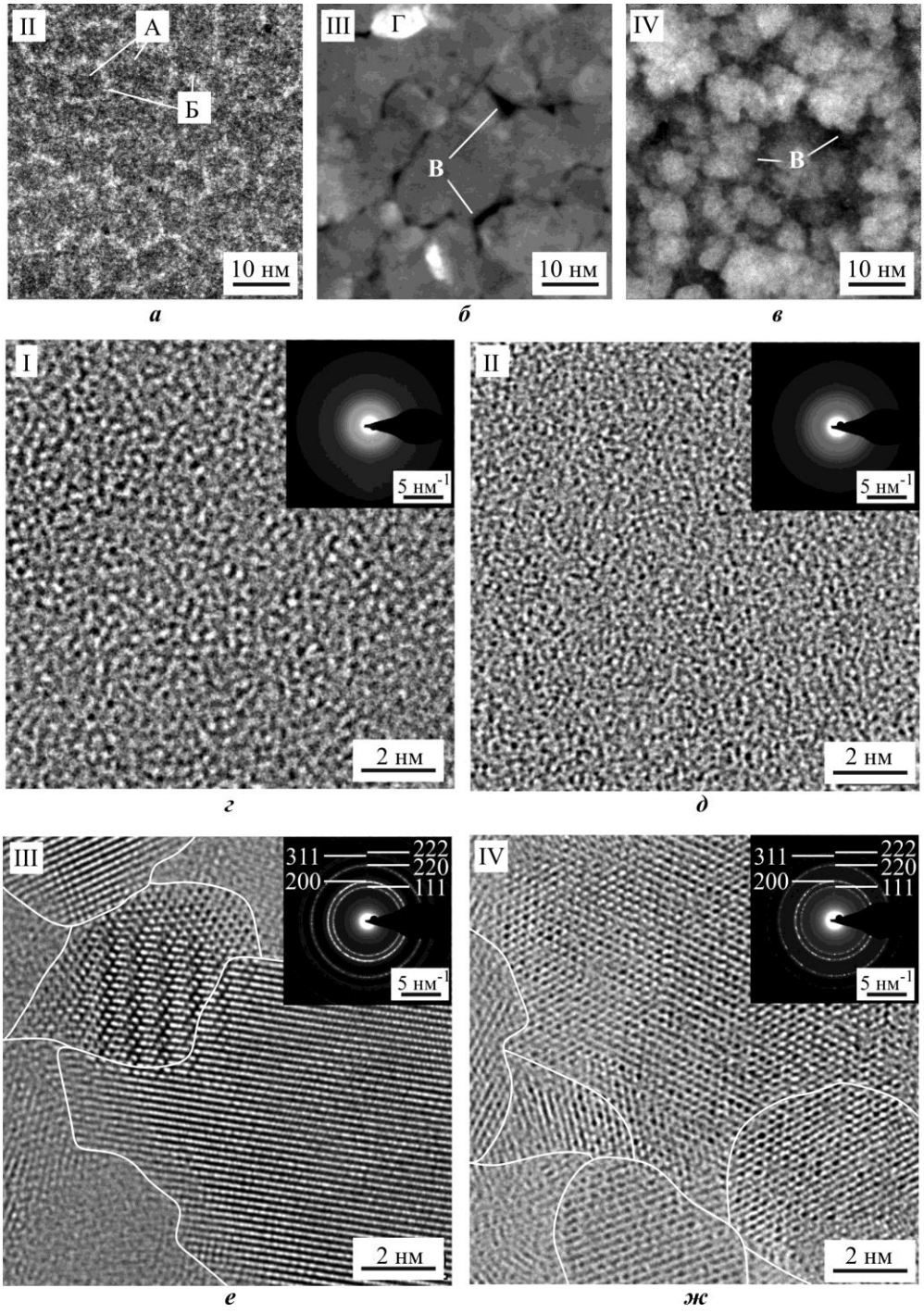


Рис. 3. ПРЭМ- (*а–в*) и ВРЭМ-микрофотографии (*г–ж*) и дифракционные картины (вставки), полученные от образца планарного сечения фотошаблона для подложки I (*г*), слоев II (*а, д*), III (*б, е*) и IV (*в, ж*): А, Б – участки с пониженной и повышенной концентрацией Mo соответственно; В – поры; Г – кристаллит, находящийся в отражающей ориентации; кривые на рис. 3 *е*, *ж* – примерные границы кристаллитов

Fig. 3. STEM (*a–c*) and HRTEM (*d–g*) micrographs and diffraction patterns (insets) obtained for the substrate I (*d*), layers II (*a*, *e*), III (*b*, *f*), and IV (*c*, *g*) of the photomask specimen prepared in nearly plan-view section: А, Б – areas with reduced and increased Mo concentrations, respectively; В – pores; Г – a crystallite in the reflective orientation; curves in fig. 3, *f*, *g* show approximate crystallite boundaries

Выводы о структуре материала подложки и слоев гетерокомпозиции, сделанные на основе ВРЭМ-изображений, подтверждаются дифракционными картинами (вставки на рис. 3, *г–ж*), которые были получены от круглых участков тонкой фольги диаметром около 600 нм. Для аморфных и поликристаллических материалов электронограммы имеют вид концентрических гало и колец соответственно. Анализ диаметров колец отражений на дифракционных картинах слоев III и IV (вставки на рис. 3, *е*, *ж*) позволил установить, что они имеют кубические кристаллические решетки с параметрами 0,406 и 0,408 нм соответственно.

Анализ размеров кристаллитов и пористости материала слоев. ВРЭМ- и ПРЭМ-изображения почти планарных сечений слоев гетерокомпозиции применяли для анализа размеров образующих их кристаллитов и пористости материала. Размеры кристаллитов (зерен) определяли по ВРЭМ-изображениям (см. рис. 3, *е*, *ж*) размером 2048 × 2048 пикселей, визуализирующим область 57 × 57 нм, с использованием графического редактора ImageJ [19]. Для этого выделяли области изображений с отличающимися узорами осцилляции интенсивности, которые соответствуют разным кристаллитам. Для оценки размеров зерен d_c их форму аппроксимировали кругами, эффективные диаметры которых вычисляли на основе площади кристаллита на изображении S_c по формуле

$$d_c = k\sqrt{\frac{4S_c}{\pi}},$$

где k = 0,03 нм/пкс – коэффициент, определяющий размер одного пикселя.

Для слоев III и IV число проанализированных кристаллитов равно 56 и 45, средние значения площадей составили около 35 и 43 нм^2, а их средние латеральные размеры $\langle d_c \rangle$ были близки к 6,7 и 7,4 нм соответственно.

Для определения пористости хромсодержащих слоев выполняли цифровую обработку их ПРЭМ-микрофотографий (см. рис. 3, *б*, *в*) в среде Matlab с применением функций программного пакета Image Processing Toolbox (IPT), а также с использованием компьютерной программы ImageJ. Шумы на микрофотографиях сглаживали с помощью усредняющей фильтрации, четкость краев пор увеличивали с помощью операции нерезкого маскирования. Неравномерно распределенный фон выравнивали с применением процедуры «катящегося шара» [25, 26], что позволило удалить случайные выбросы в распределении интенсивности на изображениях слоев и устранить ее вариации, вызванные неоднородностью образца по толщине.

Поскольку интенсивность пор меньше, чем в окружающих областях, определение их размеров возможно с помощью процедуры бинаризации изображений пористых слоев, пороговую обработку которых выполняли на основе итерационного алгоритма [25]. Для варьирования величины порога вводили параметр α, начальное значение интенсивности I_{T0} для порогового преобразования определяли как

$$I_{T0} = \alpha\left(I_{\max} + I_{\min}\right),$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – максимальное и минимальное значения интенсивности на обрабатываемом изображении.

С использованием найденного порога пиксели изображения разделяли на две группы, в одну из которых входили пиксели с меньшей интенсивностью I_1, чем I_{T0}, в дру-

гую с большей или равной I_{T0} интенсивностью I_2. Вычисление средних значений интенсивностей $\langle I_1 \rangle$ и $\langle I_2 \rangle$ в каждой из групп позволило определить новое значение порога $I_{T1} = \alpha\left(\langle I_1 \rangle + \langle I_2 \rangle\right)$ для следующего порогового преобразования. Повторение цифровой обработки изображения прекращали, если разница между порогами в последующей и предыдущей итерациях была менее 1 %.

Описанную процедуру бинаризации проводили с учетом параметра α, изменяющегося от 0,491 до 0,501 с шагом 0,001. Из рис. 4, на котором представлен фрагмент изображения слоя III, видно, что при значениях порога, полученных при $\alpha = 0{,}491$ и $\alpha = 0{,}501$, размер пор и их количество занижены (рис. 4, *а*) или завышены (рис. 4, *в*), что указывает на некорректный выбор значения α. Наиболее адекватный результат обработки изображений обоих пористых слоев III и IV достигнут при $\alpha = 0{,}498$ (рис. 4, *б*). Для обоснования выбора параметра α контуры пор, полученные с использованием бинаризованного изображения, накладывали на исходную микрофотографию. Оптимальной величине α соответствует наилучшее визуальное совпадение контуров с границами пор, окруженных наночастицами (см. рис. 3, *б*).

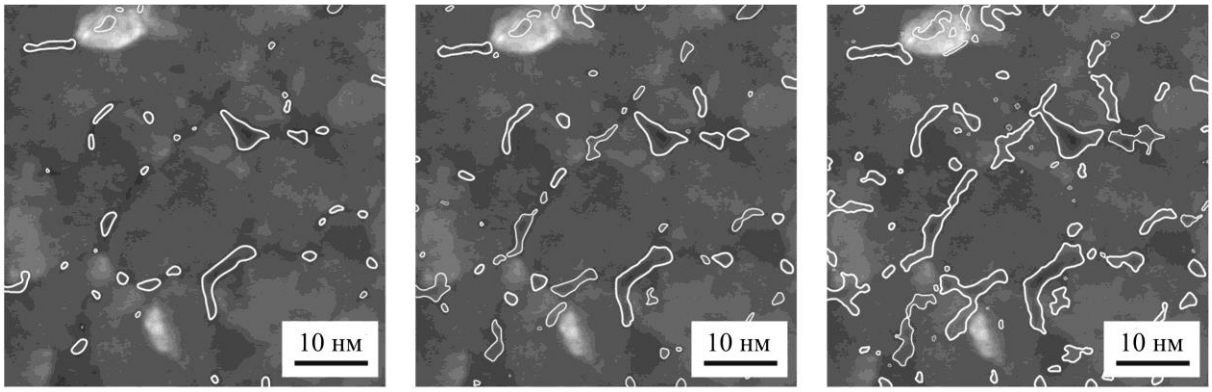


Рис. 4. Обработанные области ПРЭМ-изображения слоя $Cr_{0,49}C_{0,03}N_{0,48}$ (см. рис. 3, *б*) при разных параметрах α: 0,491 (*а*), 0,498 (*б*), 0,501 (*в*)

Fig. 4. Processing of the STEM image area of the $Cr_{0.49}C_{0.03}N_{0.48}$ layer (fig. 3, *b*), performed with different α parameter values: 0.491 (*a*), 0.498 (*b*), 0.501 (*c*)

Выполнение бинаризации изображения слоев III и IV размерами 2048 × 2048 пкс (284 × 284 нм) позволило визуализировать поры, определить площадь каждой из них и с использованием выражения для оценки размеров зерен при $k = 0{,}14$ нм/пкс вычислить их эффективные диаметры d_p. Из гистограмм распределения d_p, представленных на рис. 5, следует, что их распределение по размерам, изменяющимся в интервалах 0–8 нм в слое III и 0–10 нм в слое IV, имеет асимметричный вид. В слое III доля пор с размерами до 2,5 нм составила около 80 % (рис. 5, *а*) от общего числа. В слое IV поры можно условно разделить на две группы по размерам их эквивалентных диаметров: сравнительно мелкие с d_p менее 2 нм и долей около 57 % и крупные с d_p от 2 до 10 нм и долей, примерно равной 43 % (рис. 5, *б*). Из приведенных гистограмм видно, что максимальное число пор в обоих хромсодержащих слоях находится в диапазоне от 0,5 до 1 нм, а их доли от общего числа приблизительно составляют 22 и 18 % в слоях III и IV соответственно.

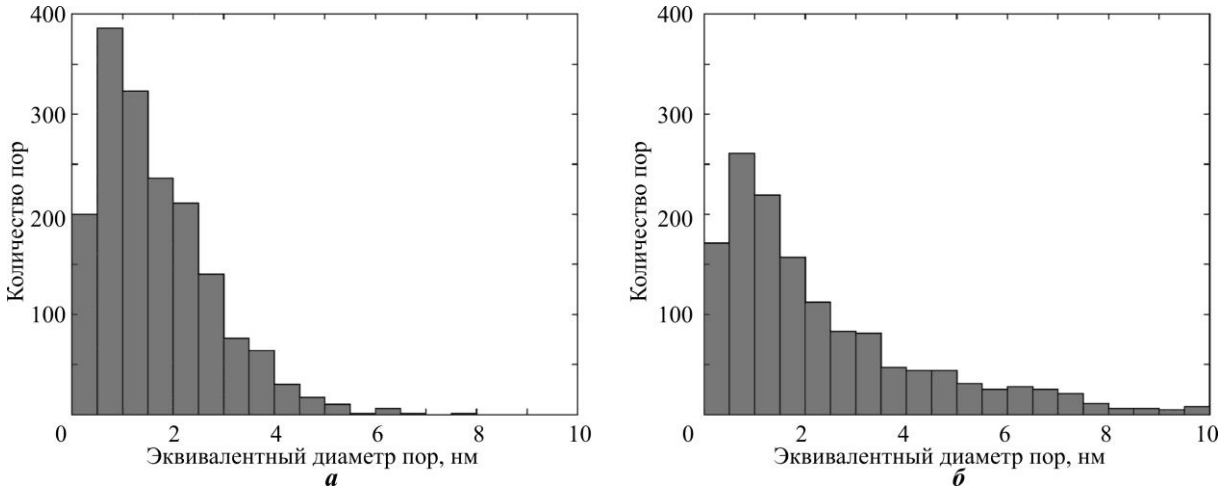


Рис. 5. Гистограммы распределения эквивалентных диаметров пор в слоях $Cr_{0,49}C_{0,03}N_{0,48}$ (*а*) и $Cr_{0,38}C_{0,05}N_{0,28}O_{0,29}$ (*б*)

Fig. 5. Distributions of equivalent pore diameters for the $Cr_{0.49}C_{0.03}N_{0.48}$ (*a*) and $Cr_{0,38}C_{0.05}N_{0.28}O_{0.29}$ (*b*) layers

Средние значения эквивалентных диаметров $\langle d_p \rangle$ пор составили 1,7 нм для слоя III и 2,5 нм для слоя IV. Для характеризации разброса латеральных размеров пор хромсодержащих слоев вычисляли среднеквадратические отклонения σ, которые равны 1,3 и 2,5 нм для слоев III и IV соответственно. Пористость P материалов слоев оценивали как отношение суммарной площади пор $S_{p\sum}$ к площади всего изображения S_{im}, она составила 6,4 и 16,6 % для слоев III и IV соответственно.

В таблице приведены геометрические параметры пор, определенные с помощью цифровой обработки и анализа ПРЭМ-микрофотографий. Из таблицы следует, что при переходе от хромсодержащего слоя III к слою IV эквивалентный диаметр пор больше почти в 1,5 раза и разброс их размеров существенно увеличился.

Геометрические параметры пор маскирующих слоев
Geometrical parameters of masking layer pores

Номер слоя	Количество пор	$S_{p\sum}$, нм^2	$\langle d_p \rangle$, нм	σ, нм	*P*, %
III	1702	5354	1,7	1,3	6,4
IV	1410	13857	2,5	2,5	16,6

Для оценки влияния величины порога на полученные данные средние эквивалентные диаметры пор $\langle d_p \rangle$ и их пористости P для анализируемых слоев определяли не только при $\alpha = 0,498$, но и при $\alpha = 0,497$ и $\alpha = 0,499$. Для трех значений параметра α вычисляли средние значения для $\langle d_p \rangle$ и P и отклонения от них. Так, разбросы латеральных размеров пор и пористости составили 0,03 нм и 0,5 % для слоя III и 0,01 нм и 0,02 % для слоя IV.

Заключение. Исследования многослойного фазосдвигающего фотошаблона, выполненные методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа, позволили идентифицировать структуру, определить состав наноразмерных слоев, получить данные о кристаллических решетках и размерах образующих их кристаллитов. С помощью развитого метода компьютерного анализа усредненных

профилей интенсивности на микрофотографиях образцов поперечного сечения прецизионно измерена толщина слоев фотошаблона, которая составила (69,91 ± 0,12) нм для молибденсодержащего и (26,42 ± 0,17) нм, (20,00 ± 0,20) нм для хромсодержащих слоев. С применением цифровой обработки ПРЭМ-изображений тонкой фольги планарного сечения установлено, что в слоях $Cr_{0,49}C_{0,03}N_{0,48}$ и $Cr_{0,38}C_{0,05}N_{0,28}O_{0,29}$ средние латеральные размеры кристаллитов близки к 6,7 и 7,4 нм, средние размеры пор приблизительно равны 1,7 и 2,5 нм, а их пористость составляет 6,4 и 16,6 % соответственно.

Литература / References

1. Ловыгин М. В., Боргардт Н. И., Бугаев А. С., Волков Р. Л., Зайбт М. Исследование структуры и состава напряженного эпитаксиального слоя в гетерокомпозиции InAlAs/GaAs(100) методами просвечивающей электронной микроскопии. *Изв. вузов. Электроника*. 2015;20(4):431–439. EDN: UDUYXT.
   Lovygin M. V., Borgardt N. I., Bugaev A. S., Volkov R. L., Seibt M. Study of the structure and composition of the strained epitaxial layer in the InAlAs/GaAs(100) heterostructure by transmission electron microscopy. *Semiconductors.* 2016;50:1753–1758. https://doi.org/10.1134/S1063782616130066
2. Feng Y., Huang Q., Zhuang Y., Sokolov A., Lemke S., Qi R. et al. Mo/Si lamellar multilayer gratings with high efficiency and enhanced resolution for the x-ray region of 1000–1700eV. *Opt. Express.* 2021;29(9):13416–13427. https://doi.org/10.1364/OE.422483
3. Kumar S., Gupta A. *Integrated circuit fabrication.* Boca Raton, FL: CRC Press; 2021. 336 p.
4. Kitui M., Mwamburi M. M., Gaitho F., Maghanda C. M. Optical properties of TiO_2 based multilayer thin films: Application to optical filters. *International Journal of Thin Film Science and Technology.* 2015;4(1):1.
5. Ben Saddik K., Fernández-Garrido S., Volkov R., Grandal J., Borgardt N., García B. J. Growth modes and chemical-phase separation in $GaP_{1-x}N_x$ layers grown by chemical beam epitaxy on GaP/Si(001). *J. Appl. Phys.* 2023;134(17):175703. https://doi.org/10.1063/5.0173748
6. Yang X., Li Ch., Wang J., Zhou B., Lin S., Xie Sh. et al. Investigation of the surface and interfacial properties of polycrystalline CdTe/monocrystalline Si structure. *J. Electron. Mater.* 2022;51(8):4378–4387. https://doi.org/10.1007/s11664-022-09682-9
7. Martin P. M. (ed.). *Handbook of deposition technologies for films and coatings: Science, applications and technology.* Oxford: William Andrew; 2010. xviii, 912 p.
8. Seshan K., Schepis D. (eds). *Handbook of thin film deposition.* 4th ed. Oxford: William Andrew; 2018. 470 p. https://doi.org/10.1016/C2016-0-03243-6
9. Yakshin A. E., Louis E., Görts P. C., Maars E. L. G., Bijkerk F. Determination of the layered structure in Mo/Si multilayers by grazing incidence X-ray reflectometry. *Physica B.* 2000;283(1-3):143–148. https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01909-2
10. Braun W. *Applied RHEED: Reflection high-energy electron diffraction during crystal growth.* Berlin: Springer-Verlag; 1999. ix, 220 p.
11. Goldstein J. I., Newbury D. E., Michael J. R., Ritchie N. W. M., Scott J. H. J., Joy D. C. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis.* 4th ed. New York: Springer; 2017. xxiii, 550 p.
12. Vickerman J. C., Briggs D. (eds). *ToF-SIMS: Materials analysis by mass spectrometry.* 2nd ed. Charlton: IM Publ.; 2013. viii, 732 p.
13. Tompkins H. G., Irene E. A. (eds). *Handbook of ellipsometry.* Norwich, NY: William Andrew; 2005. xvi, 886 p.
14. Williams D. B., Carter C. B. *Transmission electron microscopy.* 2nd ed. New York: Springer; 2016. lxii, 775 p. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76501-3
15. Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Идентификация структуры наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций методами просвечивающей электронной микроскопии. *Изв. вузов. Электроника*. 2023;28(6):711–726. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-711-726. EDN: QGSIPY.
   Volkov R. L., Borgardt N. I. Identification of the structure of nanoscale layers of multilayer heterocomposites using transmission electron microscopy. *Semiconductors.* 2023;57(1):1–10. https://doi.org/10.1134/S1063782623010098
16. Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J. TEM sample preparation and FIB-induced damage. *MRS Bulletin.* 2007;32(5):400–407. https://doi.org/10.1557/mrs2007.63

17. Velox software for transmission electron microscopy: version 3.7.0.872-b0a7ba3a2f. *ThermoFisher Scientific*. Available at: https://www.thermofisher.com/ru/ru/home/electron-microscopy/products/software-em-3d-vis/velox-software.html (accessed: 06.10.2025).
18. MATLAB: version 9.11.0.1769968 (R2021b). *MathWorks.* Available at: https://www.mathworks.com/products/matlab.html (accessed: 06.10.2025).
19. Collins T. J. ImageJ for microscopy. *BioTechniques.* 2007;43(sup1):S25–S30. https://doi.org/10.2144/000112517
20. Mitchell D. R. G. DiffTools: Electron diffraction software tools for DigitalMicrograph. *Microsc. Res. Tech.* 2008;71(8):588–593. https://doi.org/10.1002/jemt.20591
21. Mitchell D. R. G., Van den Berg J. A. Development of an ellipse fitting method with which to analyse selected area electron diffraction patterns. *Ultramicroscopy.* 2016;160:140–145. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2015.10.009
22. Mitchell D. R. G., Schaffer B. Scripting-customised microscopy tools for Digital Micrograph. *Ultramicroscopy.* 2005;103(4):319–332. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2005.02.003
23. Wojdyr M. Fityk: A general-purpose peak fitting program. *J. Appl. Cryst.* 2010;43(5-1):1126–1128. https://doi.org/10.1107/S0021889810030499
24. *ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.* М.: Стандартинформ; 2013. iii, 19 с.
GOST R 8.736–2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main principles: State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main principles. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. iii, 19 p. (In Russ.).
25. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е. *Цифровая обработка изображений.* Пер. с англ. Л. И. Рубанова, П. А. Чочиа. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера; 2012. 1104 с.
Gonzales R. C., Woods R. E. *Digital image processing.* 3rd ed. London: Pearson; 2007. 976 p.
26. Sternberg S. R. Biomedical image processing. *Computer.* 1983;16(1):22–34. https://doi.org/10.1109/MC.1983.1654163

Информация об авторах

Волков Роман Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), r.l.volkov@org.miet.ru

Киреев Георгий Сергеевич – аспирант Института физики и прикладной математики, инженер Центра коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), g.s.kireev@ya.ru

Подорожний Олег Витальевич – аспирант Института физики и прикладной математики, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), podorozhniy_oleg@rambler.ru

Решетняк Александра Романовна – магистрант Института физики и прикладной математики, инженер научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), reshaleksandra50602@mail.ru

Аникин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, директор Научно-технологического центра фотошаблонов Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), anikin_a@rambler.ru

Боргардт Николай Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики и прикладной математики, начальник Центра коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), borgardt@miee.ru

Information about the authors

Roman L. Volkov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Senior Researcher of Center for Collective Use "Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), r.l.volkov@org.miet.ru

Georgii S. Kireev – PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Engineer of Center for Collective Use "Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), g.s.kireev@ya.ru

Oleg V. Podorozhniy – PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Junior Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), podorozhniy_oleg@rambler.ru

Aleksandra R. Reshetnyak – Master's degree student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Engineer of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), reshaleksandra50602@mail.ru

Andrey V. Anikin – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Technological Center for Photo Masks, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), anikin_a@rambler.ru

Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Director of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Head of Center for Collective Use "Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), borgardt@miee.ru

Поступила в редакцию / Received 28.08.2025
Поступила после рецензирования / Revised 15.09.2025
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

Научная статья
УДК 621.3.049.774
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-721-730
EDN: HBZADP

Безъемкостный регулятор напряжения для распределенных сетей питания ИС

***П. С. Волобуев*[1,2*], *А. В. Коршунов*[2]**

[1]*НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия*
[2]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

[*] *synopsis@bk.ru*

Аннотация. Линейные LDO-регуляторы напряжения (Low-Dropout) предназначены для обеспечения питанием требовательных к качеству питания функциональных регионов СБИС. Классические емкостные регуляторы рассчитаны на компенсацию большими по номиналу емкостями, поэтому в них используются дополнительные внешние выводы корпуса микросхемы. В работе рассмотрена схемотехника безъемкостного CLDO-регулятора (Capacitorless LDO) для сетей питания ИС с региональными внутрикристальными регуляторами, которая не требует дополнительных выводов и выполнена на основе метода обратной компенсации на основе эффекта Миллера. Разработанный блок имеет малую общую внутреннюю компенсационную емкость от 10 пФ. Показано, что схемотехника CLDO-регулятора поддерживает работу при пониженном напряжении от 2,7 В для подключения внешних регуляторов. Проект топологии блока занимает ~ 0,082 мм^2, содержит встроенный источник опорных токов и представляет собой готовое интегральное решение. Уровень подавления помех по питанию составляет более 42 дБ в диапазоне частот 1–100 кГц.

Ключевые слова: микроэлектроника, безъемкостный регулятор, CLDO, сети питания, СБИС

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00518, https://rscf.ru/project/23-29-00518/) с использованием оборудования Центра коллективного пользования, научного и испытательного оборудования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

Для цитирования: Волобуев П. С., Коршунов А. В. Безъемкостный регулятор напряжения для распределенных сетей питания ИС. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):721–730. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-721-730. EDN: HBZADP.

© П. С. Волобуев, А. В. Коршунов, 2025

Original article

Capacitorless voltage regulator for ICs distributed power supply networks

***P. S. Volobuev*[1,2*], *A. V. Korshunov*[2]**

[1]*SMC "Technological Centre", Moscow, Russia*
[2]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

[*] *synopsis@bk.ru*

Abstract. Linear low-dropout (LDO) voltage regulators are intended for supplying power to the power quality demanding functional regions of VLSI. Classic capacitive regulators rely on larger nominal capacitance compensation and, for this reason, use additional integrated circuit package external IO pins. In this work, a circuit of capacitorless LDO regulator (CLDO) for VLSI power networks with regional intra-crystal regulators, performed on the basis of the Miller reverse compensation method, which does not require excessive external pins, is considered. The developed block has a small internal compensation capacity from 10 pF. It has been demonstrated that CLDO circuit is capable of operating at a lowered voltage from 2.7 V for connecting external regulators. The block topology project occupies ~ 0.082 mm^2, contains an integrated current source and is a ready-made integrated solution. The level of power supply ripples suppression is more than 42 dB in the frequency range 1–100 kHz.

Keywords: microelectronics, capacitorless voltage regulator, CLDO, power supply networks, VLSI

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-29-00518, https://rscf.ru/en/project/23-29-00518/) and carried out using the equipment and with the assistance of specialists from Resource Sharing Center "Functional Control and Diagnostics of Micro- and Nanosystem Technology" on the basis of the SMC "Technological Centre".

For citation: Volobuev P. S., Korshunov A. V. Capacitorless voltage regulator for ICs distributed power supply networks. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):721–730. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-721-730.

Введение. Полностью интегрированные CLDO-регуляторы (Capacitorless Low-Dropout) с уменьшенной площадью топологии – альтернатива емкостным LDO-регуляторам (Low-Dropout) [1]. В регуляторах данного типа за счет увеличения степени интеграции можно избежать падений уровня напряжения по линии питания и дополнительной потребляемой мощности, вызванных паразитными индуктивностями и сопротивлениями выводов корпуса. Улучшенные характеристики позволяют таким регуляторам работать в сетях питания отдельных функциональных регионов СБИС. Однако нерешенными остаются вопросы стабильности работы регуляторов [1, 2]. Например, при отказе от большой выходной емкости пропадает связанный с ней низкочастотный полюс. Изменение профиля токовой нагрузки от минимальной к максимальной и наоборот из-за возникшего энергетического дисбаланса блока емкостного LDO-регулятора может вызывать некорректное изменение выходного напряжения. Для

быстрого управления мощным транзистором M_{pass} при отсутствии основного конденсатора петлевая полоса CLDO-регулятора должна быть как можно шире. При этом эффективным решением для частотной компенсации является использование эффекта Миллера при добавлении дополнительного усилительного каскада в общую схему. Емкость Миллера C_{mil} теоретически можно заменить емкостью затвор-сток $C_{ЗС}$ транзистора M_{pass}, так как длина канала мощного транзистора проектируется больше минимально возможной. Высокий проектный ток есть фактор увеличения размеров транзистора, что вызывает необходимость увеличения емкостей коррекции и уменьшает полосу безъемкостного CLDO-регулятора.

В настоящей работе для расширения полосы пропускания применяется проектное решение из нескольких стадий усиления. Разрабатывается проект блока CLDO-регулятора для внутренних сетей питания ИС с небольшой внутренней компенсационной емкостью и возможностью его технологического переноса.

Особенности компенсации безъемкостного CLDO-регулятора напряжения. На рис. 1 приведена блок-схема организации питания функциональных регионов СБИС. Анализ литературы, посвященной теме управления питанием, показывает, что при наличии требований к работе блока на пониженном напряжении питания и размещению небольших номиналов внутрикристальных интегральных емкостей частотной коррекции применяются многокаскадные CLDO-регуляторы с компенсацией на основе эффекта Миллера [3, 4]. Однако для стандартной компенсации на основе эффекта Миллера на рабочих токах в несколько десятков миллиампер и выше стабилизирующую емкость нельзя изготовить интегрально для размещения на приемлемой площади.

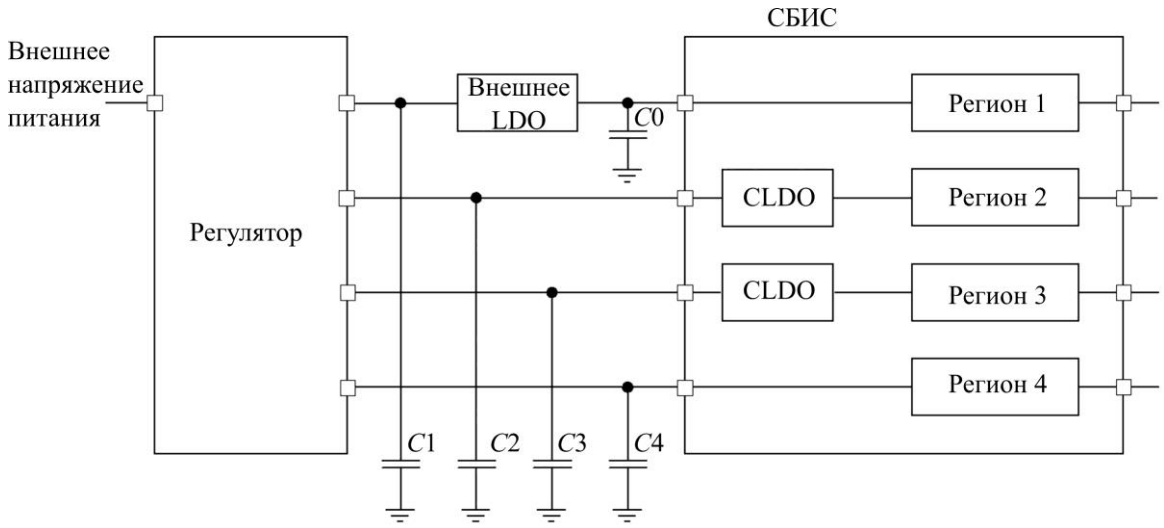


Рис. 1. Блок-схема организации питания функциональных регионов СБИС
Fig. 1. Power supply diagram for VLSI functional regions

Для частотной стабилизации многокаскадной усилительной конструкции предлагается решение на основе метода вложенной компенсации Миллера. Применение вложенных связей поддерживает широкую полосу пропускания, так как емкость, подключенная к выходному узлу, не нагружает выходной узел безъемкостного CLDO-блока. Это обеспечивает устойчивую работу схемотехники даже при значительной нагрузочной выходной емкости C_L. К каскадам, согласно схеме на рис. 2, подключаются компенсирующие конденсаторы C_{mil1} и C_{mil2}, при этом второй каскад формируется инвертирующим, а третий – неинвертирующим.

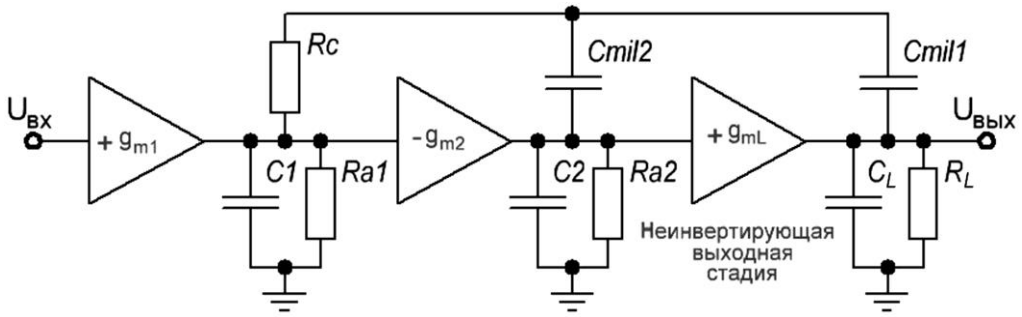


Рис. 2. Блок-схема обратной вложенной компенсации на основе эффекта Миллера
Fig. 2. Diagram for reverse nested Miller compensation

Многие альтернативные методы в дополнение или на замену выбранному в настоящей статье методу компенсации изначально были предложены для емкостных регуляторов. Подобные методы имеют свои особенности и сложности внедрения применительно к безъемкостным регуляторам. Например, при формировании доминирующего компенсирующего полюса подразумевается наличие внешней ножки для подключения большой корректирующей емкости. Метод вложенной компенсации (Nested Feedback Loop Compensation) предполагает добавление повторителя напряжения, поддерживающего транзистор M_{pass} в рабочем режиме. Однако ввиду значимости приемлемого петлевого коэффициента усиления в усилителе применяются каскоды, что повышает необходимое напряжение питания для блока в целом.

Метод устранения вероятного ноля в правой полуплоскости (Right-Half-Plane Zero Cancellation) опосредованно применен путем добавления токовой буферизации, а более сложные в реализации методы, такие как динамическая частотная компенсация (Dynamic Frequency Compensation), дополнительно включают в себя специальную буферизацию напряжения между основным усилителем и транзистором M_{pass}, позволяющую с ростом выходного рабочего тока изменять (уменьшать) выходное сопротивление, но требующую проектной настройки.

Компенсация на основе эффекта Миллера более предпочтительна с точки зрения простоты внедрения в проект. Передаточная функция системы содержит в числителе полином второго порядка, что означает при частотном анализе наличие двух нолей, в большинстве случаев в левой части комплексной плоскости. Влияние нолей в левой части на стабильность системы прогнозируемо, так как они находятся за пределами частоты единичного усиления. Однако значимый системный ноль может быть спроектирован на основе добавления небольшого резистора R_C, последовательного с емкостью Миллера.

Коэффициент усиления открытой петли обратной связи CLDO-блока из передаточной функции [3] схемы на рис. 2 определяется как

$$A_{open} = -g_{m1}g_{m2}g_{mL}R_{a1}R_{a2}R_L .$$

Частота основного полюса равна:

$$P_{dom} = p1 \approx \frac{1}{C_{mil1}R_{a1}g_{m2}R_{a2}g_{mL}R_L} .$$

Частотная эффективность системы (Gain Bandwidth Product, GBW) не зависит от емкости C_L и определяется как

$$\omega_{GBW} = \left|A_{open}\right| P_{dom} \approx g_{m1}/C_{mil1} .$$

Для исключения нахождения ноля в правой полуплоскости (при отсутствии резистора R_C) предлагается использовать механизм токовой буферизации, разрывающий цепь непосредственной обратной связи компенсирующей емкости.

Компенсация механизмом токовой буферизации. При рассмотрении неосновных полюсов с точки зрения зависимости от тока нагрузки следует выделить полюс, связанный с выходным узлом. При большом токе нагрузки полюсы имеют действительные значения и находятся в левой полуплоскости *s*-плоскости. При уменьшении тока нагрузки ситуация со стабильностью начинает ухудшаться: падает запас по фазе системы. При снижении запаса по фазе ниже 40–45° и дальнейшем падении рабочего тока система характеризуется нестабильным состоянием.

Для надежного функционирования блока необходимо убрать упреждающую связь в системе путем добавления буфера напряжения или тока и добавить в топологию выходной шунт, определяющий фиктивный минимальный рабочий ток. Реализована схема буферизации с модификацией, в которую развязывающие каскады добавлены согласно рис. 3. В схеме используется напряжение $U_{\text{опор}}$ с интегрального источника опорного напряжения.

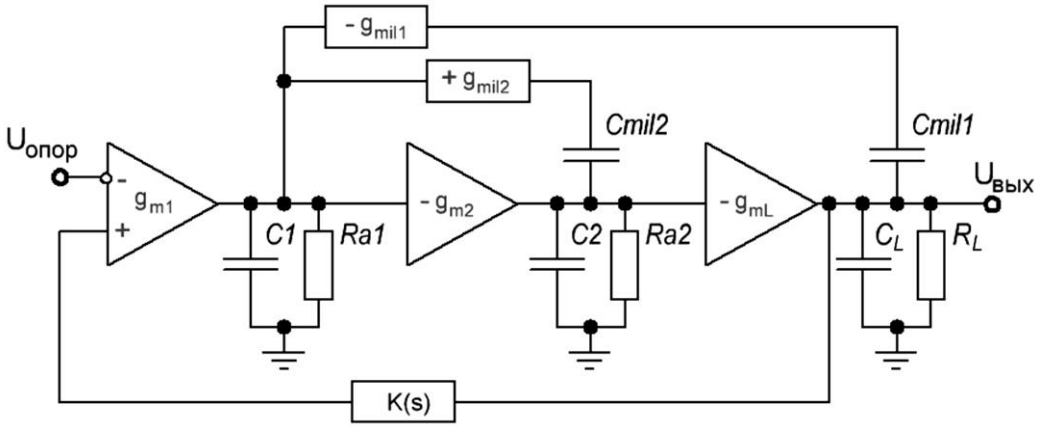


Рис. 3. Компенсация на основе эффекта Миллера с токовой буферизацией
Fig. 3. Miller compensation with current buffering

Для формирования ноля в левой полуплоскости неинвертирующего буфера тока корректирующий конденсатор подключен к входу токового зеркала (рис. 4), инвертирующего буфера тока – по принципу каскодной компенсации к транзистору по схеме «общий затвор».

Принципиальная схема регулятора с внутренней компенсацией (рис. 5) содержит *N*-канальную дифференциальную пару с каскодной нагрузкой. Емкость Миллера C_m компенсирует ноль, формируемый транзистором M_{pass}, а емкости C_{mil1} и C_{mil2} осуществляют петлевую компенсацию.

Произведение $\left|A_{open}\right| P_{dom}$ рассчитано малым настолько, чтобы все неосновные полюсы лежали за пределами частоты единичного усиления. При небольших токах нагрузки это утверждение должно выполняться, так как становясь комплексными, неосновные полюсы создают на диаграмме Боде пики коэффициента усиления, что приводит к общей нестабильности системы. Следует отметить, что частота единичного усиления и положение полюсов значительно варьируются при изменении профиля токовой нагрузки.

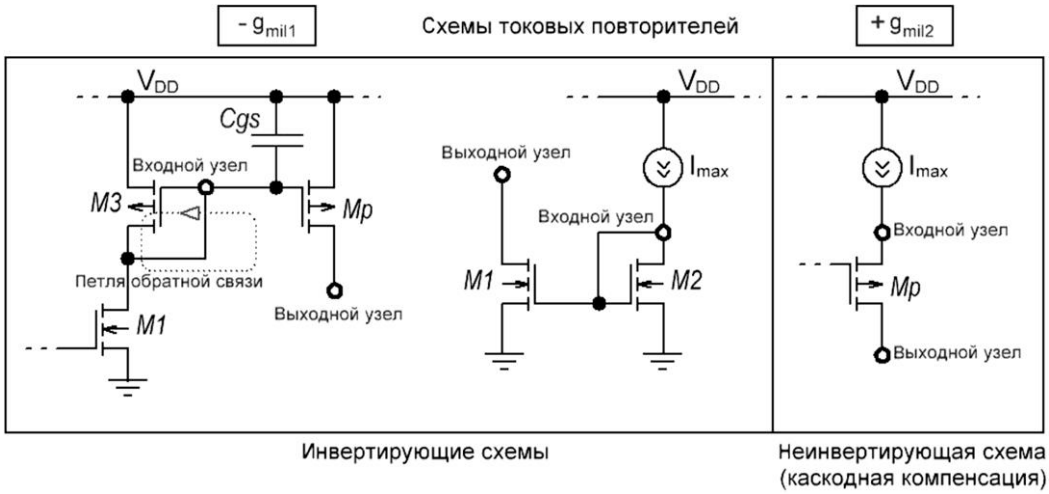


Рис. 4. Схемы применяемых токовых повторителей
Fig. 4. Electrical circuits of current buffers

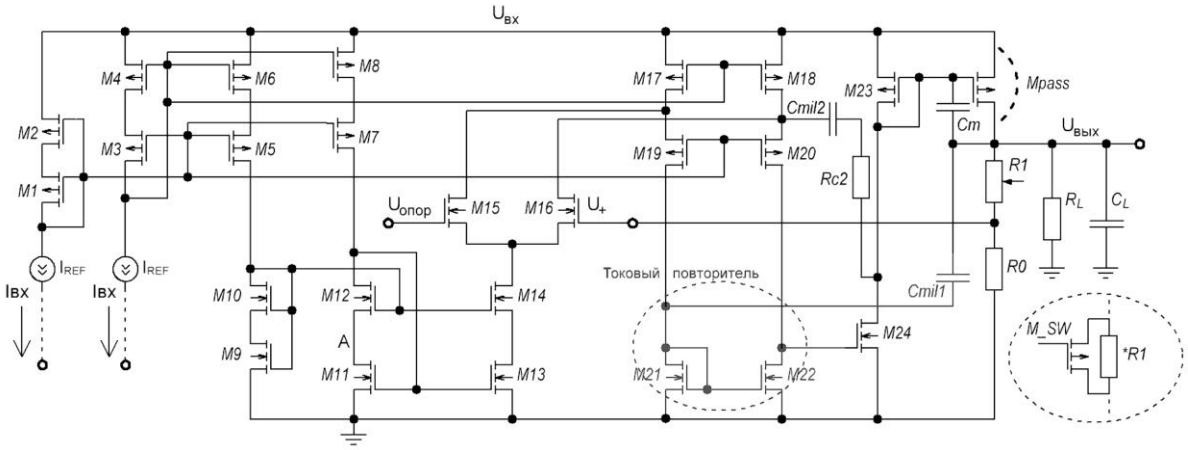


Рис. 5. Принципиальная схема разработанного безъемкостного CLDO-регулятора
Fig. 5. Electrical circuit of the developed CLDO regulator

Передаточная функция разработанной схемы в дополнение к основному полюсу $p1$ содержит неосновной полюс $p2$:

$$p2 \approx -\frac{1}{R_{C2}C_{mil2} + \frac{C_{mil2}}{g_{m2}} + \frac{C_{mil2}C_L}{g_{mL}C_{mil1}}} \approx -\frac{g_{mL}C_{mil1}}{C_{mil2}C_L}.$$

Особенностью применяемой для блока LDO-регулятора компенсации является то, что емкость коррекции C_{mil1} при буферизации формирует ноль $z1$, который компенсируется неосновным полюсом $p3$:

$$z1 = p3 = -\frac{g_{m1}}{C_{mil1}}.$$

Емкость коррекции C_{mil2} с резистором R_{C2}, подключенная к выходу второго каскада, формирует дополнительный ноль $z2$:

$$z2 = -\frac{1}{C_{mil2}R_{C2}}.$$

Наличие в эквивалентной схеме на рис. 5. емкости C_L обусловлено тем, что при интеграции блока LDO-регулятора она эмулирует емкость шин распределенной сети питания. При этом регулятор сглаживает просадки выходного напряжения при резком изменении нагрузочного тока.

Результаты и их обсуждение. Проведенный на основе предложенной принципиальной электрической схемы частотный анализ подтверждает общую стабильность блока CLDO-регулятора (рис. 6).

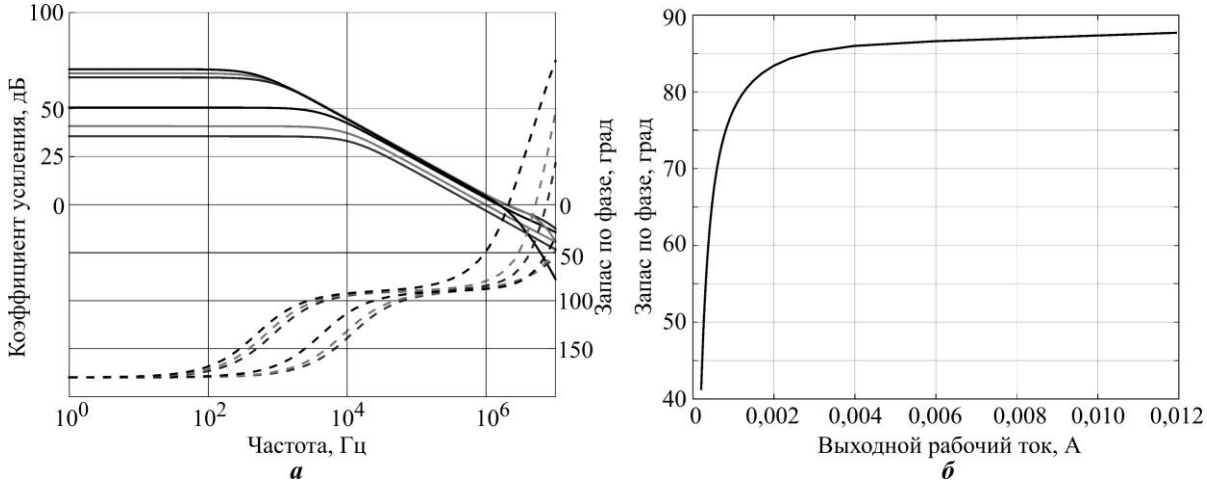


Рис. 6. Частотный анализ стабильности блока безъемкостного CLDO-регулятора: *а* – диаграмма Боде; *б* – зависимость запаса по фазе петли CLDO-регулятора от выходного рабочего тока
Fig. 6. Frequency analysis of CLDO regulator block stability: *a* – diagram of the Bode loop; *b* – dependence of the phase margin of the CLDO regulator loop on the operating current

При минимальном токе в нагрузке (менее 100 мкА) блок показывает приемлемый уровень запаса по фазе (выше 40°). Для улучшения запаса по фазе в области низких выходных токов распределение общей потребляемой мощности по каскадам выполнено таким образом, чтобы на каскадах, формирующих неосновные полюсы, был больший процент от общего тока потребления. Такой эффективный подход позволил перенести частоты неосновных полюсов в область более высоких значений.

Для проведения расчетов коэффициента подавления шумов по питанию *PSR* [5, 6] петля обратной связи системы была замкнута и к входу регулятора подключен источник опорного напряжения. Для подавления дополнительного шума в схеме использован входной *RC*-фильтр с низкой частотой среза (~ 200 кГц). Фильтрационная емкость до 10 пФ не оказывает существенного влияния на переходные процессы при включении CLDO-регулятора. Для устранения повышенных значений параметра *PSR* в области средних частот со стороны выхода CLDO-регулятора в топологии использована нагрузочная емкость C_L.

Проведенный частотный анализ подтверждает стойкость регулятора к помехам

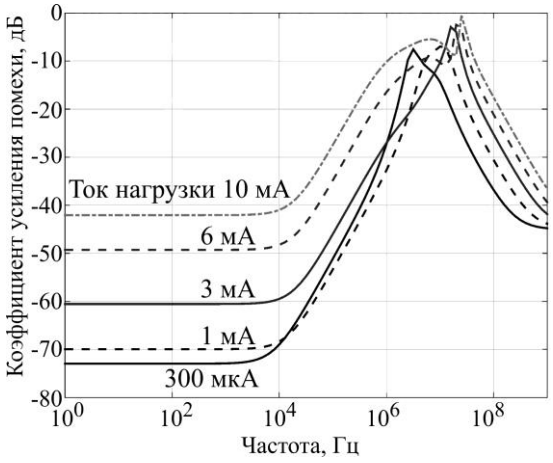


Рис. 7. Рассчитанные значения коэффициента *PSR* для CLDO-регулятора
Fig. 7. Calculated *PSR* values for CLDO regulator

по питанию в широком диапазоне частот (рис. 7). Отметим, что классические емкостные регуляторы имеют лучший коэффициент *PSR* по сравнению с безъемкостными аналогами.

Результаты временного анализа (рис. 8, *а*) основываются на резком изменении профиля токовой нагрузки от 0,1 до 5 мА на выходе CLDO-регулятора. На рис. 8, *б* показано изменение напряжения на выходе блока при треугольном профиле нагрузки.

Характеристики разработанного CLDO-регулятора и регуляторов, аналогичных по функциональности, представлены в таблице.

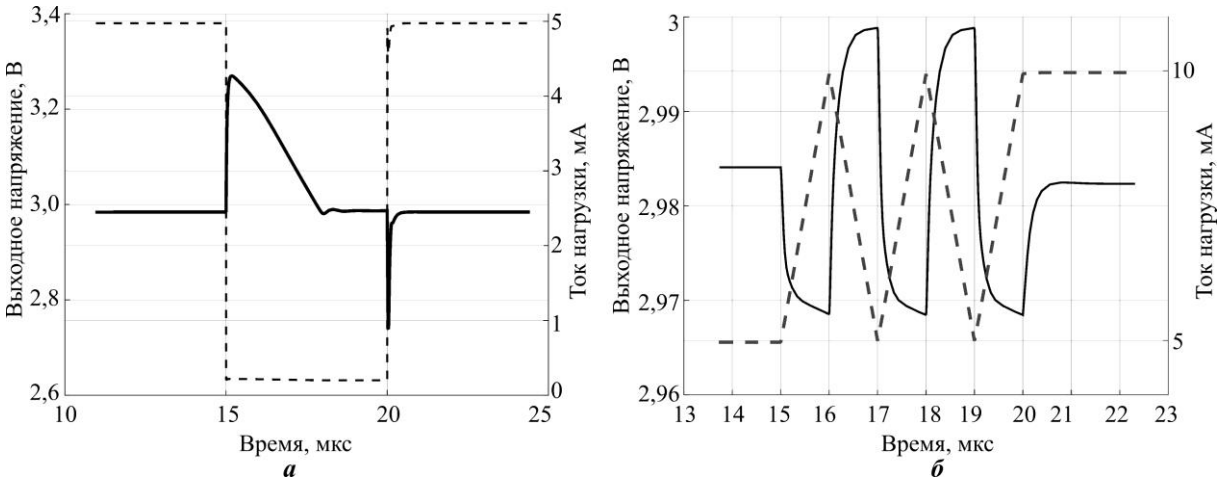


Рис. 8. Временной отклик блока CLDO-регулятора на изменение нагрузки от 0,1 до 5 мА (*а*) и при треугольном нарастающем профиле нагрузки (*б*)
Fig. 8. CLDO regulator block timing response to a change in load from 0,1 to 5 mA (*a*) and with a triangular incremental load profile (*b*)

Характеристики безъемкостных CLDO-регуляторов
Specifications of the CLDO regulators

Параметр	Настоящая работа	Источник			
		[7]	[8]	[9]	[10]
	Технология, нм				
	250	350	110	500	500
Входное напряжение $U_{вх}$, В	2,7–3,6	2,5–4	1,8–3,8	2,3–5,5	1,5–5,0
Выходное напряжение $U_{вых}$, В	2,7–3	–	2,0	1,2–5,4	1,3–4,8
Нагрузка, мА	до 15 (проект)	100	200	150	600
Падение напряжения, В	0,2	0,15	0,2	0,1	0,2
Максимальный ток η, %	97,8	99,9	99,98	99,97	99,95
Ток покоя, мкА	335 (общий с источником тока)	Рассчитывается на основе параметра η			
Нестабильность выходного напряжения, мВ/В	3	1	8,9	0,0024	0,156
Нестабильность по нагрузке, мВ/мА	0,3	0,08	0,108	0,00004	0,011
PSR CLDO-регулятора, дБ	42 на 10 кГц	–	–	57,75 на 10 кГц	26,7 на 1 МГц
Площадь, мм^2	0,082 (общая с источником тока)	0,064	0,21	0,279	0,082

Топология безъемкостного CLDO-регулятора показана на рис. 9. Вследствие небольших номиналов корректирующих емкостей при создании регулятора, рассчитанного на более высокие выходные рабочие токи, структурная компоновка блока не изменится и он сохранит компактную площадь, что является преимуществом разработанного проекта.

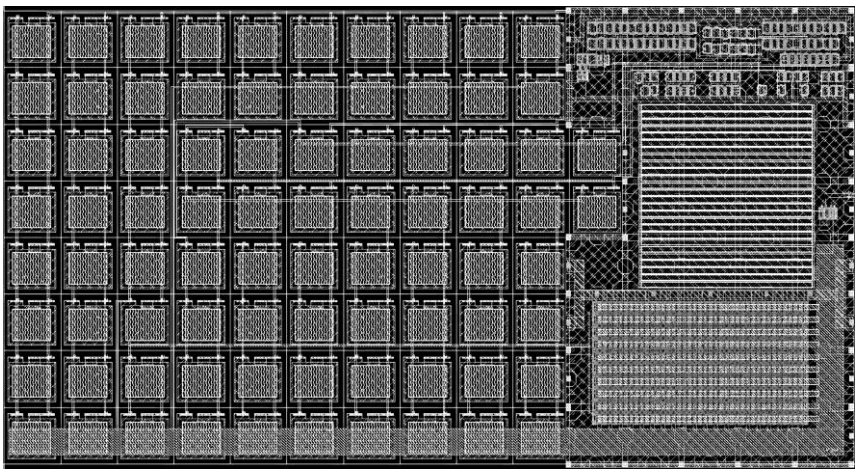


Рис. 9. Топология разработанного безъемкостного CLDO-регулятора
Fig. 9. Topology of the proposed CLDO regulator

Заключение. Разработанный и исследованный в технологическом КМОП-базисе безъемкостный CLDO-регулятор предназначен для работы в сетях питания современных ИС. Реализованный способ частотной компенсации на основе эффекта Миллера для сложнофункционального блока регулятора с применением токовой буферизации при формировании вложенных (упреждающих) связей позволяет получить компактный проект топологии регулятора без необходимости подключения внешних емкостей коррекции. Это улучшает условия по размещению нескольких таких блоков в составе ИС для организации питания отдельных потребителей. Блок обладает малым номиналом внутренних компенсирующих емкостей (суммарно ~ 10 пФ) и имеет настраиваемое цифровым способом выходное напряжение.

Полученные результаты моделирования и проектные решения могут быть использованы для создания низковольтных блоков безъемкостных CLDO-регуляторов с внутренней частотной компенсацией.

Литература / References

1. Zeng Z., Ye X., Feng Z., Li P. Tradeoff analysis and optimization of power delivery networks with on-chip voltage regulation. In: *Design Automation Conference.* Anaheim, CA: IEEE; 2010, pp. 831–836.
2. Mustafa N. B., Amin S., Reaz M. B. I., Hashim F. H., Kamal N. Evolution of low drop out voltage regulator in CMOS technologies. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2015;(12):95242. https://doi.org/10.15199/48.2015.12.06
3. Rincon-Mora G. *Analog IC design with low-dropout regulators (LDOs).* New York: McGraw-Hill; 2009. 400 p.
4. Chyan T. Y., Ramiah H., Hatta S. F. W. M., Lai N. Sh., Lim Ch.-Ch., Chen Y. Evaluation and perspective of analog low-dropout voltage regulators: A review. *IEEE Access.* 2022;10:114469–114489. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3217919
5. Zhan C., Ki W.-H. An output-capacitor-free cascode low-dropout regulator with low quiescent current and high power supply rejection. In: *2010 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems.* Kuala Lumpur: IEEE; 2010, pp. 472–475. https://doi.org/10.1109/APCCAS.2010.5775048

6. Gupta V., Rincon-Mora G. A., Raha P. Analysis and design of monolithic, high PSR, linear regulators for SoC applications. In: *IEEE International SOC Conference, 2004. Proceedings.* Santa Clara, CA: IEEE; 2004, pp. 311–315. https://doi.org/10.1109/SOCC.2004.1362447
7. Ming X., Li Q., Zhou Z., Zhang B. An ultrafast adaptively biased capacitorless LDO with dynamic charging control. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs.* 2012;59(1):40–44. https://doi.org/10.1109/TCSII.2011.2177698
8. Kim Y., Lee S. A capacitorless LDO regulator with fast feedback technique and low-quiescent current error amplifier. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs.* 2013;60(6):326–330. https://doi.org/10.1109/TCSII.2013.2258250
9. Hong S.-W., Cho G.-H. High-gain wide-bandwidth capacitor-less low-dropout regulator (LDO) for mobile applications utilizing frequency response of multiple feedback loops. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regul. Pap.* 2016;63(1):46–57. https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2512702
10. Park J., Lee B., Hong S.-W. An output capacitorless low-dropout regulator with a low-V_{DD} inverting buffer for the mobile application. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2020;67(10):8931–8935. https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2951296

Информация об авторах

Волобуев Павел Сергеевич – старший преподаватель Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1); научный сотрудник отдела интегральных микросхем НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), synopsis@bk.ru

Коршунов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной деятельности Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), korsh84@yandex.ru

Information about the authors

Pavel S. Volobuev – Senior Lecturer of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1); Scientific Researcher of the Integrated Circuits Department, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), synopsis@bk.ru

Andrey V. Korshunov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Deputy Director for Scientific Activities of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), korsh84@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 08.11.2024
Поступила после рецензирования / Revised 18.11.2024
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

Научная статья
УДК 621.396.677.3
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-731-740
EDN: IGAPCY

Анализ излучающих систем АФАР Ka-диапазона

***Е. И. Минаков*[1], *Е. А. Макарецкий*[1], *С. А. Лагутин*[1], *А. Л. Переверзев*[2*], *К. С. Лялин*[2]**

[1]*Тульский государственный университет, г. Тула, Россия*
[2]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

[*] *pal@olvs.miee.ru*

Аннотация. При построении активных фазированных антенных решеток (АФАР) для эксплуатации в высоких частотах (от L-диапазона до X- и Ku-диапазонов) возникают проблемы, связанные с уменьшением длины волны и необходимостью сокращения размеров приемопередающих модулей. Главным образом это обусловлено построением излучающей системы АФАР, низким КПД усилителей мощности передающей части и обеспечением теплового режима АФАР. В работе показаны возможные варианты построения излучающей системы АФАР Ka-диапазона. Для оценки применимости неэквидистантных антенных решеток в излучающих системах АФАР Ka-диапазона проведено моделирование характеристик антенных решеток с неравномерным шагом расположения излучателей. Показано, что преимуществами неэквидистантной апертуры АФАР являются увеличение места для размещения модулей и установки теплоотводящих шин, возможность увеличения размеров модулей, расположения излучателей разных поляризаций и осуществления полного поляризационного приема. Выполнен сравнительный анализ выходной мощности АФАР с продольной интеграцией и поперечной сборкой, а также поперечной интеграцией с продольной сборкой от условий охлаждения. Полученные результаты показывают, что, несмотря на меньшее число излучателей, возможно достижение более высокой мощности СВЧ-излучения неэквидистантной АФАР за счет улучшения условий охлаждения модулей в разреженной антенной решетке.

Ключевые слова: АФАР, излучающая система, неэквидистантная антенная решетка, приемопередающий модуль

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и инноватике Тульской области (грант в форме субсидии на проведение научных исследований №15 от 21 июня 2024 г.).

Для цитирования: Минаков Е. И., Макарецкий Е. А., Лагутин С. А., Переверзев А. Л., Лялин К. С. Анализ излучающих систем АФАР Ka-диапазона. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):731–740. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-731-740. EDN: IGAPCY.

© Е. И. Минаков, Е. А. Макарецкий, С. А. Лагутин, А. Л. Переверзев, К. С. Лялин, 2025

Original article

Analysis of active phased array radiating systems of the Ka band

E. I. Minakov[1], E. A. Makaretsky[1], S. A. Lagutin[1], A .L. Pereverzev[2*], K. S. Lyalin[2]

[1]Tula State University, Tula, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

[*] *pal@olvs.miee.ru*

Abstract. Due to its advantages, over the past decade there has been a rapid development of active phased array towards higher and higher frequencies – from L band to X and Ku bands. However, when switching to higher frequency ranges, the problems of active phased array construction begin to worsen, due to the decrease in wavelength and the necessary reduction in the size of the receiving and transmitting modules. First of all, this is due to the construction of the active phased array radiating system, the low efficiency of the power amplifiers of the transmitting part and the problem of ensuring the thermal regime of the active phased array. The purpose of the work is to evaluate possible options for constructing a radiating active phased array system in the Ka range. To assess the applicability of non-equidistant antenna arrays in the active phased array range emitting systems, the characteristics of antenna arrays with uneven spacing of the radiators were modeled. The advantages of the non-equidistant active phased array aperture are an increase in the location of the modules and for the installation of heat-dissipating buses, the possibility of increasing the size of the modules and the location of emitters of various polarizations, and the implementation of full polarization reception. A comparative analysis of the active phased array output power with longitudinal integration and transverse assembly and transverse integration with longitudinal assembly depending on cooling conditions has been carried out. The results obtained show that, despite the smaller number of emitters, it is possible to achieve higher microwave radiation power of non-equidistant active phased array by improving the cooling conditions of the modules in a sparse antenna array.

Keywords: active phased array, AFAR, radiating system, unequal antenna array, transceiver modul

Funding: the work was carried out with the financial support of the Committee on Science and Innovation of the Tula Region (grant in the form of a research grant from No. 15 dated June 21, 2024).

For citation: Minakov E. I., Makaretsky E. A., Lagutin S. A., Pereverzev A .L., Lyalin K. S. Analysis of active phased array radiating systems of the Ka band. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):731–740. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-731-740.

Введение. В последнее десятилетие ведутся работы по созданию активных фазированных антенных решеток (АФАР) для эксплуатации в высоких частотах – от L-диапазона до X- и Ku-диапазонов. Однако при переходе в более высокочастотные диапазоны возникают проблемы построения АФАР, связанные с уменьшением длины

волны и необходимостью сокращения размеров приемопередающих модулей (ППМ). В первую очередь это обусловлено построением излучающей системы АФАР, низким КПД усилителей мощности передающей части и сложностью обеспечения теплового режима АФАР.

АФАР имеют следующие преимущества перед пассивными антенными решетками [1]:

– возможность получения высоких уровней мощности излучения при ограниченной мощности усилителей (генераторов) в каналах излучателей;

– значительно более высокое быстродействие из-за применения маломощных фазовращателей и наличие дополнительной степени свободы для управления уровнем амплитуды на выходе с помощью регулирования коэффициента передачи усилительных каскадов, что позволяет быстро изменять амплитудно-фазовое распределение возбуждения и характеристики излучения;

– более высокий КПД вследствие снижения потерь мощности в распределительной системе и фазовращателях;

– повышенная эксплуатационная надежность за счет избыточности активных элементов.

Цель настоящей работы – оценка возможных вариантов построения излучающей системы АФАР Ка-диапазона.

Требования к излучающей системе АФАР Ка-диапазона. Излучающая система АФАР должна обеспечивать требуемую ширину диаграммы направленности луча без дифракционных максимумов в диаграмме направленности, иметь низкий уровень боковых лепестков (УБЛ) и широкий диапазон углов сканирования луча.

Для устранения дифракционных максимумов в диаграмме направленности шаг расположения излучателей в апертуре антенны выбирается согласно соотношениям [2]:

– для прямоугольной сетки расположения излучателей

$$d_x < \frac{\lambda}{(1+\sin\theta_{x\max})}, \quad d_y < \frac{\lambda}{(1+\sin\theta_{y\max})},$$

где λ – длина волны излучения; $\theta_{x\max}$, $\theta_{y\max}$ – максимальные углы сканирования по осям x и y;

– для гексагональной (треугольной) сетки

$$a < 2\lambda / \left[\sqrt{3}(1+\sin\theta_{\max})\right].$$

Допустимое расстояние и, соответственно, максимальный поперечный размер ППМ для длины волны 8 мм и углов сканирования ±45° при прямоугольной сетке составляет 4,6 мм (площадь поперечного сечения ППМ S = 21 мм^2), при гексагональной сетке – 5,4 мм (S = 25 мм^2).

Низкий КПД (20–25 %) СВЧ-усилителей Ка-диапазона [3] приводит к проблеме отвода тепловой мощности P, выделяемой в ППМ АФАР. При выходной мощности СВЧ-канала P = 1 Вт мощность тепловыделений только в усилителе мощности канала составляет около 4 Вт. При этом поверхностная плотность тепловыделений ППМ более 10^4 Вт/м^2, что требует использования интенсивных методов охлаждения при практическом отсутствии объема для размещения тепловых труб или каналов жидкостного охлаждения. В таких условиях актуально оценить возможность применения разреженных антенных решеток с неэквидистантным расположением излучателей.

Анализ характеристик неэквидистантных антенных решеток для АФАР. Для оценки применимости неэквидистантных антенных решеток в излучающих системах АФАР Ка-диапазона проведено моделирование характеристик антенных решеток с неравномерным шагом расположения излучателей. Неэквидистантные антенные решетки синтезированы по методике «подсолнух» [4, 5] с равноамплитудным распределением излучателей и числом элементов 100, 200 и 500. Форма апертуры круговая, расположение излучателей в решетках показано на рис. 1. Диаграмма направленности излучателя аппроксимируется выражением $F(\theta) = \cos\theta$.

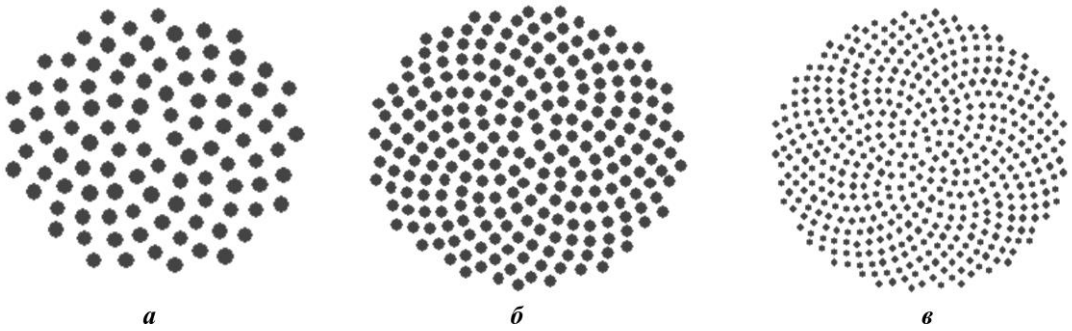


Рис. 1. Расположение излучателей в неэквидистантных решетках с числом элементов 100 (*а*), 200 (*б*) и 500 (*в*)
Fig. 1. Location of emitters in non-equidistant arrays with number of elements 100 (*a*), 200 (*b*) and 500 (*c*)

В процессе моделирования оценивали зависимости параметров неэквидистантной антенной решетки – коэффициента направленного действия D и уровня боковых лепестков SSL – от расстояния между элементами решетки s и угла отклонения луча θ. Пространственное распределение лепестков диаграммы направленности в логарифмическом масштабе антенной решетки показано на рис. 2. Как видно из рисунка, диаграмма направленности имеет сложную структуру, содержащую большое число боковых лепестков различного уровня. При увеличении числа излучающих элементов в апертуре общая структура диаграммы направленности сохраняется, «кольцо» боковых лепестков максимальной амплитуды приближается к главному максимуму, но происходит снижение их уровня.

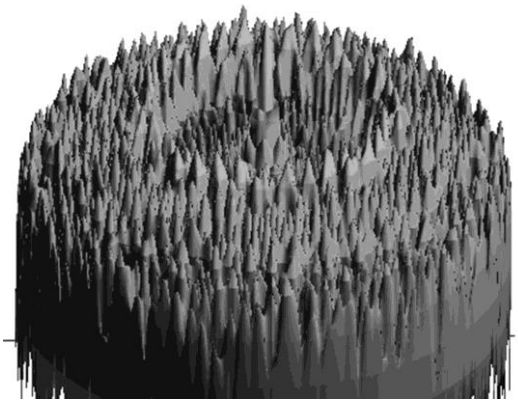


Рис. 2. Пространственная диаграмма направленности неэквидистантной антенны (N = 50, $s = 4\lambda_0$, диаметр антенной решетки 250 мм)
Fig. 2. Spatial radiation pattern of non-equidistant antenna (N = 50, $s = 4\lambda_0$, diameter of antenna array is 250 mm)

На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования диаграмм направленности неэквидистантных антенных решеток с разными параметрами при сканировании луча. Результаты моделирования показывают, что для неэквидистантной антенны уровень боковых лепестков в основном зависит от числа излучателей в антенной решетке, так как УБЛ оценивается значением $2/\sqrt{N}$ [6]. При одном и том же расстоянии между излучателями (см. рис. 3) в зависимости от общего числа излучателей УБЛ существенно изме-

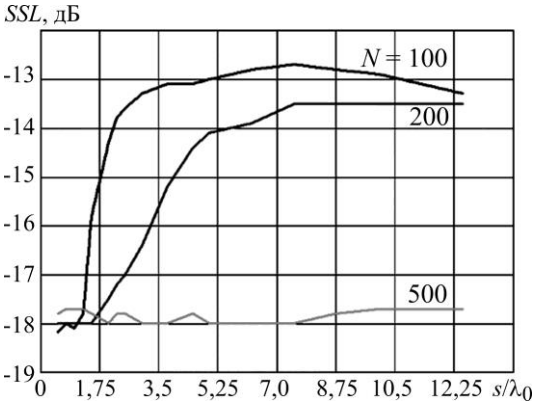


Рис. 3. Зависимость УБЛ *SSL* от относительного расстояния s/λ_0 между излучателями для разного числа элементов в решетке

Fig. 3. Dependences of sidelobe level *SSL* on relative distance s/λ_0 between emitters for different number of elements in the array

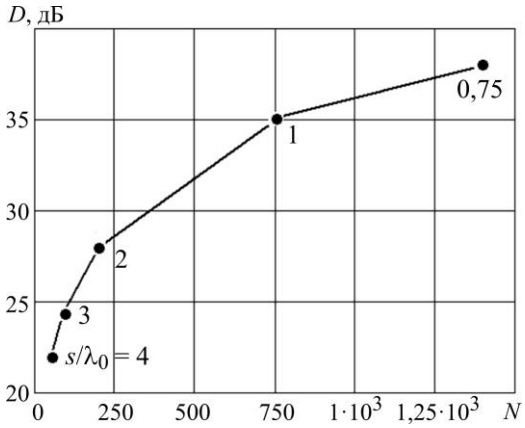


Рис. 4. Зависимость коэффициента направленного действия *D* антенной решетки диаметром 250 мм от числа элементов *N* в апертуре (λ = 8 мм)

Fig. 4. Dependence of antenna directivity coefficient *D* for array with diameter 250 mm on number of elements *N* in the aperture (λ = 8 mm)

няется. Коэффициент направленного действия неэквидистантной решетки при постоянном размере апертуры увеличивается с ростом числа излучателей в апертуре (см. рис. 4), что характерно для данного типа антенн. В процессе сканирования максимума диаграммы направленности растет УБЛ, но эта зависимость сильнее проявляется при небольшом числе излучателей (рис. 5). Если излучателей более 500, рост УБЛ становится несущественным.

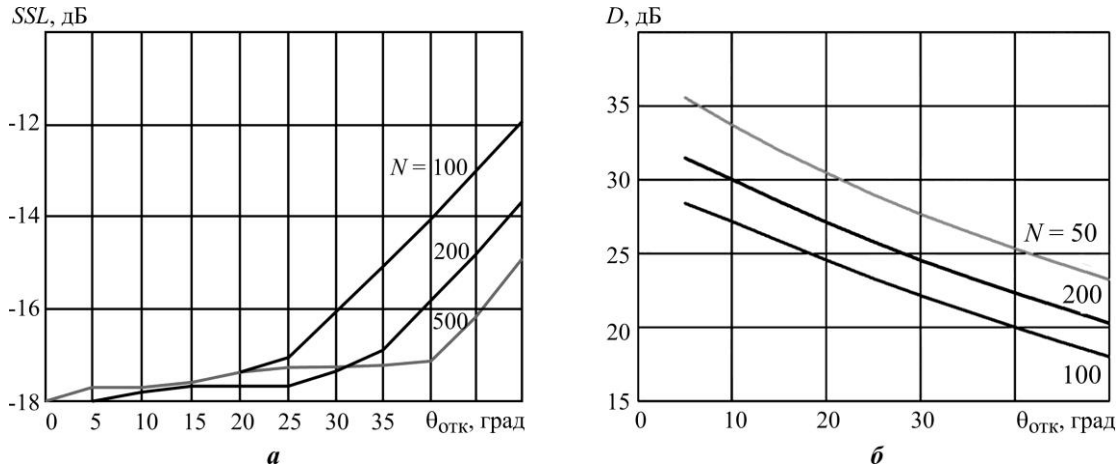


Рис. 5. Зависимости УБЛ *SSL* (*а*) и коэффициента направленного действия *D* (*б*) от угла отклонения луча $\theta_{отк}$ для разного числа излучателей в решетке *N*

Fig. 5. Dependences of sidelobe level *SSL* (*a*) and antenna directivity coefficient *D* (*b*) on beam deflection angle $\theta_{отк}$ for different number of emitters in the array *N*

С помощью моделирования установлено, что использование неэквидистантной антенной решетки с равноамплитудным распределением обеспечивает сканирование диаграммы направленности АФАР в диапазоне углов ±45° при УБЛ менее –16 дБ с учетом расстояний между излучателями, позволяющих конструктивно реализовать ППМ. Спадающее к краям амплитудное распределение дополнительно снижает УБЛ.

Существенным недостатком неэквидистантных решеток по сравнению с эквидистантными, имеющими большее число излучателей, является снижение выходной мощности АФАР, поскольку выходная мощность АФАР определяется суммой мощностей ППМ.

Оценка допустимой мощности излучения АФАР Ка-диапазона. При оценке допустимой мощности излучения АФАР необходимо учитывать возможность отвода тепла от ППМ. Эта проблема усугубляется с уменьшением длины волны и сокращением размеров ППМ. Теплообмен ППМ зависит от его конструкции. В настоящее время получили распространение два типа конструкций ППМ [7]: продольная интеграция с поперечной сборкой LITA (Longitudinal Integration and Transverse Assembly); поперечная интеграция с продольной сборкой TILA (Transverse Integration and Longitudinal Assembly).

В нижней части СВЧ-диапазона преимущественно используется вариант LITA, когда функциональные компоненты ППМ располагаются последовательно от излучателя по нормали к апертуре АФАР (см. рис. 5). Формирование апертуры происходит в результате объединения параллельно расположенных ППМ. Часто несколько каналов АФАР объединяются в одном корпусе с общим вторичным источником питания. ППМ охлаждается тепловыми шинами с их боковой поверхности. Из-за малых поперечных размеров ППМ Ка-диапазона формирование полной эквидистантной апертуры по технологии LITA затруднительно.

Для высокочастотных Ка- и W-диапазонов преимущества имеет конструкция TILA, при которой АФАР строится «послойно» – излучающие элементы, усилители мощности, фазовращатели и т. д. (рис. 6) [7]. Площадь теплообмена в этом случае не превышает площади апертуры, и увеличение выходной мощности может осуществляться только за счет повышения интенсивности теплообмена. В результате выходная мощность канала ограничена. Так, в АФАР Ка-диапазона, разрабатываемой по программе DARPA США [8, 9], выходная мощность на канал составляет ~ 50 мВт.

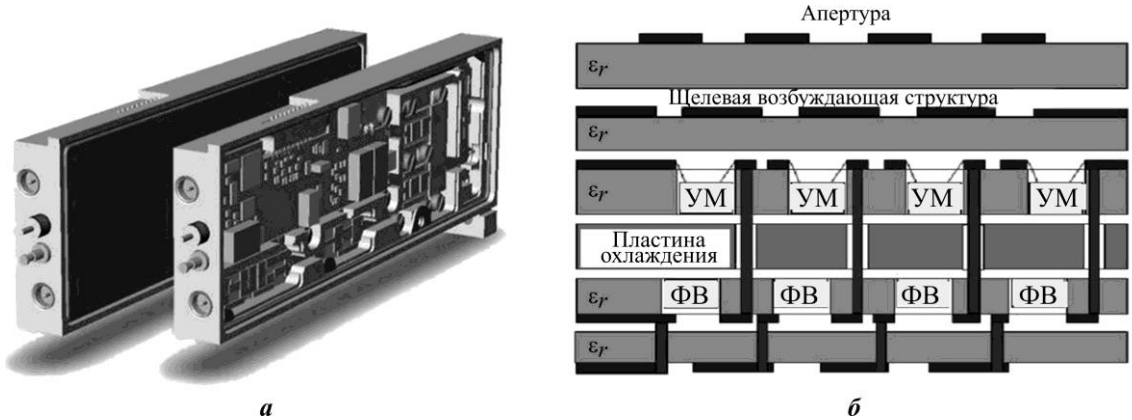


Рис. 6. Конструкции ППМ АФАР: *а* – LITA; *б* – TILA (УМ – усилитель мощности; ФВ – фазовращатель)
Fig. 6. Constructions of transceiver module AFAR: *a* – LITA; *b* – TILA (УМ – power amplifier; ФВ – phase shifter)

Отметим, что при использовании неэквидистантных антенных решеток в АФАР, выполненных по технологии LITA, увеличиваются допустимые размеры ППМ и упрощаются условия их охлаждения, что позволяет повысить мощность излучения. Оценим возможный выигрыш по мощности излучения в этих условиях по сравнению с вариантом полностью заполненной апертуры. При оценке будем учитывать следующие при-

ближения: антенна имеет апертуру круглой формы диаметром D; ППМ имеет в поперечном сечении квадратную форму размером a, равным размеру ячейки излучающего элемента АФАР: $a = \sqrt{S_1}$, $S_1 = \pi D^2/(4N)$, где N – число излучателей в апертуре; ППМ охлаждается с двух боковых поверхностей модуля; при заданном типе системы охлаждения известна поверхностная плотность мощности q_1, Вт/м^2, отводимая с поверхности ППМ. Оценить значения поверхностной плотности мощности q_1, отводимой с поверхности радиоэлектронной аппаратуры, можно по графикам [10] для областей целесообразных методов охлаждения в зависимости от поверхностной плотности тепловыделений q и допустимого перегрева элемента ΔT (рис. 7).

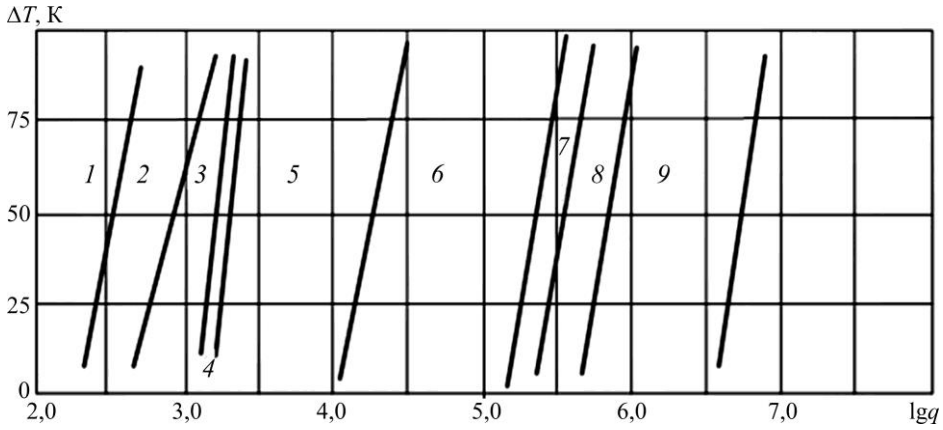


Рис. 7. Области целесообразных методов охлаждения [6] в зависимости от поверхностной плотности тепловыделений q и допустимого перегрева элемента: *1* – естественное воздушное; *2* – естественное или принудительное воздушное; *3* – принудительное воздушное; *4* – принудительное воздушное или жидкостное; *5* – принудительное жидкостное; *6* – принудительное жидкостное или естественное испарительное; *7* – принудительное жидкостное или естественное либо принудительное испарительное; *8* – естественное или принудительное испарительное; *9* – принудительное испарительное охлаждение

Fig. 7. Areas of expedient cooling methods [6] depending on surface heat flux density q and permissible element overheating: *1* – natural air; *2* – natural or forced air; *3* – forced air; *4* – forced air or liquid; *5* – forced liquid; *6* – forced liquid or natural evaporative; *7* – forced liquid or natural or forced evaporative; *8* – natural or forced evaporative; *9* – forced evaporative cooling

При допустимом перегреве поверхности модуля (50 К) и использовании интенсивного принудительного жидкостного или естественного испарительного охлаждения поверхностная плотность отводимой мощности составит ~ 10^4 Вт/м^2 (данное значение является практически верхним пределом интенсивности теплообмена). Принимая длину модуля L = 0,1 м и общий КПД ППМ η = 0,1, можно рассчитать оценочные зависимости мощности излучения АФАР от УБЛ для разных диаметров апертуры АФАР. Для примера на рис. 8 приведены расчетные зависимости мощности излучения АФАР с неэквидистантным расположением излучателей и эквидистантным расположением излучателей с шагом 0,7 длины волны от УБЛ для разных диаметров апертуры АФАР.

Полученные результаты в пределах сделанных допущений показывают, что, несмотря на меньшее число излучателей, можно достичь более высокой мощности СВЧ-излучения неэквидистантной АФАР за счет улучшения условий охлаждения модулей в разреженной антенной решетке. При относительно высоких УБЛ антенны чис-

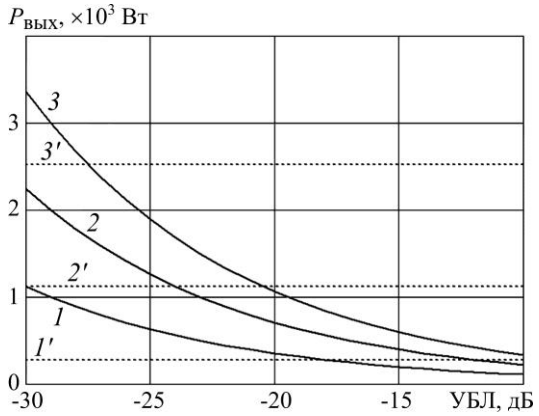


Рис. 8. Расчетные зависимости мощности излучения АФАР от уровня боковых лепестков для различных диаметров *D* апертуры АФАР: *1–3* и *1′–3′* – неэквидистантное и эквидистантное расположения элементов соответственно

Fig. 8. Calculated dependences of AFAR radiated power on sidelobe level for different AFAR aperture diameters *D*: *1–3* и *1′–3′* – non-equidistant and equidistant arrangement of elements, respectively

ло излучателей в апертуре невелико и, несмотря на хорошие условия охлаждения, суммарная мощность излучения АФАР ниже, чем для регулярной апертуры. При снижении УБЛ происходит рост необходимого числа излучателей в соответствии с соотношением $2/\sqrt{N}$ в условиях достаточной интенсивности охлаждения (по сравнению с эквидистантной решеткой с малым шагом) и суммарная мощность излучения неэквидистантной апертуры становится больше, чем равномерной. Возможный выигрыш (в зависимости от диаметра апертуры и УБЛ) может достигать 1,2–2 раза по мощности излучения. При выполнении АФАР по технологии TILA при той же интенсивности теплообмена мощность излучения для апертуры диаметром 200 мм может составить не более 30–50 Вт.

Заключение. Полученные результаты показывают, что применение неэквидистантных антенных излучающих систем в АФАР Ка-диапазона имеет преимущества перед эквидистантными апертурами: возможность увеличения места для расположения ППМ и их размеров, что ведет к упрощению технологии; допустимость расположения излучателей для различных видов поляризаций излучения и осуществление полного поляризационного приема; обеспечение интенсивного теплообмена и за счет этого повышение выходной мощности ППМ.

Литература / References

1. Гостюхин В. Л. (авт., ред.), Трусов В. Н., Гостюхин А. В. *Активные фазированные антенные решетки.* 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника; 2011. 303 с.
Gostyukhin V. L. (auth., ed.), Trusov V. N., Gostyukhin A. V. *Active phased antenna arrays.* 3rd ed., rev. and upd. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2011. 303 p. (In Russ.).
2. Воскресенский Д. И. (авт., ред.), Степаненко В. И., Филиппов В. С., Гостюхин В. Л., Грановская Р. А., Котов Ю. В. *Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток:* учеб. пособие для вузов. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Радиотехника; 2003. 632 с.
Voskresenskiy D. I. (auth., ed.), Stepanenko V. I., Filippov V. S., Gostyukhin V. L., Granovskaya R. A., Kotov Yu. V. *Microwave devices and antennas. Phased antenna array design:* study guide for universities. 3rd ed., upd. and rev. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2003. 632 p. (In Russ.).
3. METDA semiconductors. *METDA Technology Co.* Available at: https://www.metdac.com/Down.html?companfileCateId=1 (accessed: 05.09.2025).
4. Boeringer D. W. *Phased array including a logarithmic spiral lattice of uniformly spaced radiating and receiving elements.* Patent US, 6433754B1, 13.08.2002.
5. Viganó M. C., Toso G., Caille G., Mangenot C., Lager I. E. Sunflower array antenna with adjustable density taper. *Int. J. Antennas Propag.* 2009;(spec.iss.):624035. https://doi.org/10.1155/2009/624035
6. Вендик О. Г., Парнес М. Д. *Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию):* учеб. пособие для вузов. Ред. Л. Д. Бахрах. М.: Сайнс-пресс; 2002. 231 с.
Vendik O. G., Parnes M. D. *Electronic scanning antennas (introduction to theory):* study guide for universities. Ed. L. D. Bakhrakh. Moscow: Sayns-press Publ.; 2002. 231 p. (In Russ.).

7. Усачев В. А., Голов Н. А., Виленский А. Р., Кудрявцева Н. В. Перспективные малогабаритные антенные системы миллиметрового диапазона для специальных применений. *Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана.* 2011;(10):3. EDN: OIUBXN.
Usachev V. A., Golov N. A., Vilenskiy A. R., Kudryavtseva N. V. Promising small-sized millimeter wave antenna systems for special purposes. *Nauka i obrazovanie: nauch. izd. MGTU im. N. E. Baumana.* 2011;(10):3. (In Russ.).
8. Hancock T. M. Millimeter wave digital arrays (MIDAS). *WiscWeb WordPress Service.* Available at: https://mmwrcnece.wiscweb.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/678/2019/02/Keynote_2_Hancock_012919.pdf (accessed: 05.09.2025).
9. Hancock T. M., Gross S., McSpadden J., Kushner L., Milne J., Hacker J. The DARPA millimeter wave digital arrays (MIDAS) program. In: *2020 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS).* Monterey, CA: IEEE; 2020, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/BCICTS48439.2020.9392956
10. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. *Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры.* М.: Сов. радио; 1976. 230 с.
Rotkop L. L., Spokoynyy Yu. E. *Temperature conditions control in designing radio electronic equipment.* Moscow: Sov. radio Publ.; 1976. 230 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Минаков Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92), eminakov@bk.ru

Макарецкий Евгений Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92), makaretsky@mail.ru

Лагутин Сергей Александрович – аспирант кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92), serega-13l@mail.ru

Переверзев Алексей Леонидович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационному развитию, директор Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина, ведущий научный сотрудник НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pal@olvs.miee.ru

Лялин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник отделения НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ksl@miee.ru

Information about the authors

Evgeniy I. Minakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Radio Electronics Department, Tula State University (Russia, 300012, Tula, Lenin ave., 92), eminakov@bk.ru

Evgeniy A. Makaretskiy – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof. of the Radio Electronics Department, Tula State University (Russia, 300012, Tula, Lenin ave., 92), makaretsky@mail.ru

Sergey A. Lagutin – PhD student of the Radio Electronics Department, Tula State University (Russia, 300012, Tula, Lenin ave., 92), serega-13l@mail.ru

Alexey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Vice-Rector for Innovative Development, Director of the Institute of Micro Devices and Control Systems, Leading Researcher of the Research Institute of Computing and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pal@olvs.miee.ru

Konstantin S. Lyalin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Head of Department of the Research Institute of Computing and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ksl@miee.ru

Поступила в редакцию / Received 20.06.2025
Поступила после рецензирования / Revised 04.08.2025
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
BIOMEDICAL ELECTRONICS

Научная статья
УДК 539.216.1:537.533.35
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-741-753
EDN: SACXMB

Исследование процесса деградации ГКР-активных капилляров для комплексного использования в спектроскопии комбинационного рассеяния света и сканирующей ион-проводящей микроскопии

Д. В. Новиков[1], Ю. В. Чумаченко[1*], С. В. Дубков[1], В. С. Колмогоров[2,3], П. В. Горелкин[2], А. С. Ерофеев[2], Ю. Н. Пархоменко[2], Л. С. Волкова[1,4], А. В. Железнякова[1], В. Ф. Попенко[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия
[3]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[4]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия

[*] *julia.chumachenko@mail.ru*

Аннотация. Исследование отдельных живых клеток организма и клеточных колоний в их естественной среде имеет большое значение для понимания клеточных процессов и фенотипов. В отличие от традиционных методов сканирующая ион-проводящая микроскопия и спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) позволяют получать информацию о незначительных изменениях химического состава и механических характеристик клеток. В работе проведено исследование характеристик ГКР-активных капилляров на основе наночастиц Ag, изучены механические характеристики клеток и выявлена динамика деградации свойств капилляров при различных условиях хранения. С помощью растровой электронной микроскопии установлено, что при кривизне острия капилляра 50 нм массив наночастиц демонстрирует наибольшую плотность и коэффициент усиления при этом порядка 10^5. Проведено сканирование топографии и механических свойств клеток SH-SY5Y с использованием ГКР-активного капилляра методом сканирующей ион-проводящей микроскопии. Посредством ГКР-спектроскопии установлено, что и на воздухе, и в вакуумном эксикаторе процесс деградации наночастиц Ag протекает за один месяц, после чего прекращается.

© Д. В. Новиков, Ю. В. Чумаченко, С. В. Дубков, В. С. Колмогоров, П. В. Горелкин, А. С. Ерофеев, Ю. Н. Пархоменко, Л. С. Волкова, А. В. Железнякова, В. Ф. Попенко, 2025

Ключевые слова: нанокапилляры, сканирующая ион-проводящая микроскопия, гигантское комбинационное рассеяние света, ГКР, серебряные наночастицы

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00824) и в рамках государственного задания (2024-2026 FSMR-2024-0012 (Дополнительное соглашение № 075-03-2024-061/3).

Для цитирования: Новиков Д. В., Чумаченко Ю. В., Дубков С. В., Колмогоров В. С., Горелкин П. В., Ерофеев А. С. и др. Исследование процесса деградации ГКР-активных капилляров для комплексного использования в спектроскопии комбинационного рассеяния света и сканирующей ион-проводящей микроскопии. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):741–753. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-741-753. EDN: SACXMB.

Original article

Investigation of the degradation process of SERS-active capillaries for complex use in Raman spectroscopy and scanning ion conductance microscopy

D. V. Novikov[1], J. V. Chumachenko[1*], S. V. Dubkov[1], V. S. Kolmogorov[2,3], P. V. Gorelkin[2], A. S. Erofeev[2], Yu. N. Parkhomenko[2], L. S. Volkova[1,4], A. V. Zheleznyakova[1], V. F. Popenko[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2] National University of Science and Technology "MISiS", Moscow, Russia
[3]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[4]Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[*] *julia.chumachenko@mail.ru*

Abstract. The study of individual living cells of an organism and cell colonies in their natural environment is of great importance for understanding cellular processes and phenotypes. Dissimilar to traditional methods, scanning ion-conducting microscopy (SICM) and surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) allow obtaining information about minor changes in the chemical composition and mechanical characteristics of cells. In this work, the characteristics of SERS-active capillaries based on Ag nanoparticles (NPs) are investigated, the mechanical characteristics of cells are studied, and the dynamics of capillary properties degradation under various storage conditions were revealed. Scanning electron microscopy has shown that at 50 nm of curvature of the capillary tip, the nanoparticle array exhibits the highest density and gain of the order of 10^5. The topography and mechanical properties of SH-SY5Y cells were scanned using a SERS-active capillary by the SICM method. By means of SERS spectroscopy, it has been established that both in air and in a vacuum desiccator, the degradation process of Ag NPs proceeds in 1 month, after which it stops.

Keywords: nanocapillaries, scanning ion-conductance microscopy, surface-enhanced Raman spectroscopy, silver nanoparticles

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-19-00824) and within the framework of the state assignment (2024-2026 FSMR-2024-0012 Supplementary agreement no. 075-03-2024-061/3).

For citation: Novikov D. V., Chumachenko J. V., Dubkov S. V., Kolmogorov V. S., Gorelkin P. V., Erofeev A. S. et al. Investigation of the degradation process of SERS-active capillaries for complex use in Raman spectroscopy and scanning ion conductance microscopy. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):741–753. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-741-753.

Введение. Традиционные методы анализа отдельных клеток организма [1, 2] не позволяют получать информацию о незначительных изменениях в них [3, 4], тем самым делают невозможным диагностировать заболевания на ранних стадиях. Для решения данной проблемы в настоящее время актуальна зондовая микроскопия, в частности сканирующая ион-проводящая микроскопия (СИПМ) [5–7]. Применение современных технологий для получения капилляров с нанометровым диаметром выходного отверстия (нанокапилляров) дает возможность отобразить топографию поверхности микро- и нанометрового разрешения для наблюдения за живыми клетками и изменениями в них [8–10]. Перспективным направлением исследования клеток является комплексное использование СИПМ, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света. Модифицированный плазмонными металлами Au, Ag и Cu [11] капилляр может работать в качестве зонда в существующих методах. Посредством КРС-спектров будут возможны получение молекулярного состава клетки, а также обнаружение и идентификация отдельных молекул [12, 13].

В работе [14] представлена методика формирования массива наночастиц Ag методом вакуумно-термического испарения на вращающуюся пипетку для СИПМ-исследований живых клеток, точной дифференциации местоположения пипетки в клетке и сверхчувствительного обнаружения аномалий в молекулярном составе мембраны, цитоплазмы и ядра.

В настоящей работе исследуются модифицированные наночастицами капилляры с разной кривизной острия, по данным ГКР-активности капилляров изучается их стабильность в зависимости от времени и условий хранения.

Подготовка эксперимента и оборудование. Капилляры с внутренним диаметром 0,5 мм, внешним диаметром 1,0 мм, длиной 7,5 см изготовлены из боросиликатного стекла (WPI, Hitchin, Hertfordshire, Великобритания). Капилляры радиусом 40, 50 и 60 нм получены CO_2-лазерным пуллером P-2000 (Sutter Instrument, США).

Металлические наночастицы Ag сформированы на вращающемся капилляре методом вакуумно-термического испарения (MVU TM TIS 02, АО «НИИТМ», Россия) с последующей термообработкой. В качестве материала для испарения использовали навеску серебра массой (30,2 ± 0,2) мг. Остаточное давление в камере составляло примерно $3 \cdot 10^{-5}$ торр. Вращение капилляров осуществляли с помощью коллекторного электродвигателя размером 25 × 38 мм со скоростью 14,4 об/с. Отжиг образцов проводили в вакууме при температуре 230 °C в течение 30 мин. До и после процесса осаждения наночастиц одну партию капилляров хранили в вакууме при комнатной температуре, а другую в атмосфере для отслеживания деградации массива наночастиц.

Методы исследования. Морфологию полученных массивов наночастиц серебра изучали с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (РЭМ)

Helios C4GX (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США). Визуализацию модифицированных образцов из пипетки проводили при ускоряющем напряжении 1 кВ и токе 16 пА при увеличении в 160 000 раз. Полученные РЭМ-изображения анализировали с применением программного обеспечения ImageJ 1,49v. Статистический анализ геометрических параметров массивов наночастиц Ag, таких как средний диаметр наночастиц d, среднее расстояние между наночастицами l, стандартное отклонение σ, относительное стандартное отклонение для d (σ/d) и l (σ/l), выполняли стандартными математическими инструментами.

Кварцевые капилляры с массивом 30 мг наночастиц Ag измеряли на конфокальном микроскопе Confotec MR200 на длине волны 532 нм при мощности лазера 44 мкВт в режиме картирования с линейной областью сканирования 42 × 1 мкм и количеством точек 21. Область сканирования позиционировалась так, чтобы последняя точка в линии гарантированно попадала на острие капилляра. Диаметр лазерного пятна 1 мкм, длительность съемки в одной точке 1 мс. После завершения картирования суммарный спектр со всех точек сохранялся и использовался для дальнейших обработки и анализа. В качестве аналитического вещества выступал водный раствор 10 мкМ родамина R6G, в котором капилляры выдерживали в течение 10 мин.

Сканирующий ион-проводящий микроскоп (ICAPPIC Limited, Великобритания) использовали для бесконтактного топографического сканирования и оценки модуля Юнга клеток нейробластомы SH-SY5Y с помощью модифицированных капилляров. Сканирующую платформу устанавливали на инвертированный оптический микроскоп Nikon Ti-2 (Nikon, Япония). Капилляр заполняли раствором Хэнкса и закрепляли в держателе. Внутрь капилляра помещали Ag/AgCl-электрод для создания ионного тока. Капилляр подводили к поверхности раствора Хэнкса для измерения ионного тока. Диапазон размеров капилляров 45–50 нм соответствует току 1900–2200 пА.

Перед процедурой сканирования клетки отмывали от культуральной среды раствором Хэнкса с содержанием Ca^{2+} и Mg^{2+} и 10 мМ HEPES. Сканирование проводили в растворе Хэнкса в бесконтактном режиме с амплитудой перемещения по оси Z, равной 2000 нм. Расстояние между измеряемыми точками поверхности 250 нм, количество пикселей в кадре 256 × 256, скорость нагружения капилляра к поверхности 100 мкм/с. Чашку Петри помещали на сканирующую платформу, расположенную внутри камеры Фарадея для изоляции от внешних электрических шумов.

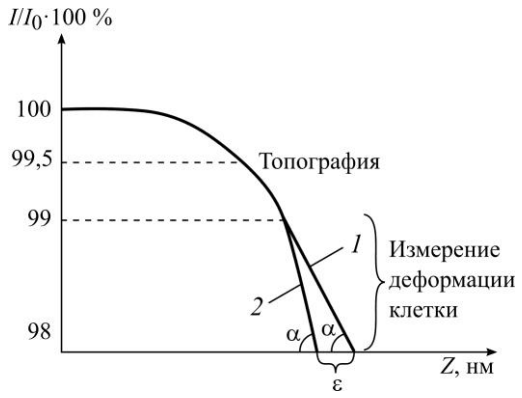


Рис. 1. Кривые падения тока на клетке (*1*) и над субстратом (*2*)
Fig. 1. Current drop curves on the cell (*1*) and above the substrate (*2*)

Сканирование осуществляется за счет регистрации снижения ионного тока, проходящего через острие капилляра при подаче электрического напряжения между двумя Ag/AgCl-электродами. При приближении острия капилляра к поверхности образца на расстояние, сопоставимое с радиусом капилляра, наблюдается снижение тока. Падение ионного тока на 0,5 % от исходного значения соответствует координатам топографии клеток. Далее капилляр достигает значения падения ионного тока, составляющего 2 % от исходного значения. Координаты по оси Z (от 1 до 2 % снижения ионного тока) соответствуют деформации поверхности клеток ε (рис. 1).

Вычитая кривую падения тока на недеформируемом субстрате, можно определить истинную деформацию поверхности клетки. Для оценки модуля Юнга E применяется следующая теоретическая модель:

$$E = P\left(\frac{S_{sub}}{S_{cell}} - 1\right)^{-1},$$

где P – приложенное давление; S_{sub} и S_{cell} – наклон кривой на субстрате и клетке соответственно.

Полученные данные обрабатывали с использованием программного обеспечения Image Viewer и Origin Lab.

Результаты и их обсуждение. РЭМ-изображения массива наночастиц Ag, сформированного на капиллярах с разной кривизной острия, приведены на рис. 2. Анализ РЭМ-изображений позволил установить, что наиболее плотный массив (250 частиц/мкм^2 со средним диаметром частиц ~ 51 нм) демонстрирует капилляр с кривизной 50 нм (рис. 2, *а*). При этом капилляры с кривизной 40 нм (рис. 2, *б*) и 60 нм (рис. 2, *в*) характеризуются практически идентичными менее плотными массивами (таблица).

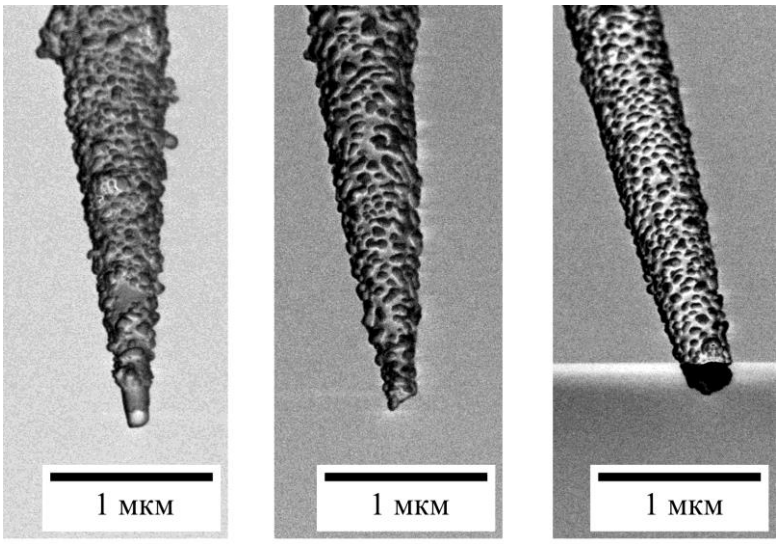


Рис. 2. РЭМ-изображения кончиков декорированных наночастицами Ag капилляров с кривизной острия 50 (*а*), 40 (*б*), 60 нм (*в*)
Fig. 2. SEM images of the tips of Ag nanoparticles decorated capillaries with tip curvature of 50 (*a*), 40 (*b*), 60 nm (*c*)

Параметры массива наночастиц Ag на капиллярах с разной кривизной острия
Parameters of the array of Ag NPs on capillaries with different tip curvature

Кривизна острия, нм	Плотность частиц, мкм$^{-2}$	Средний диаметр частиц, нм	Среднее расстояние между частицами, нм	Теоретический коэффициент усиления
50	250	51	14	$6{,}6 \cdot 10^4$
40	185	64	16	$1{,}1 \cdot 10^5$
60	181	57	15	$7{,}8 \cdot 10^4$

Результаты измерения показывают, что наилучшее качество спектра – интенсивность и четкость пиков – достигается при использовании капилляра с кривизной острия 50 нм, интенсивность пика 1360 см$^{-1}$ которого составила 31 000 отн. ед. Капилляры с кривизной 40 и 60 нм продемонстрировали интенсивность пика 1360 см$^{-1}$ порядка 1600 и 1800 отн. ед. соответственно. Отметим, что интенсивность пика 1360 см$^{-1}$ для капилляра с кривизной острия 50 нм в 18 раз выше, чем для капилляров с кривизной острия 40 и 60 нм (рис. 3). Коэффициент усиления составил порядка $1{,}4 \cdot 10^5$.

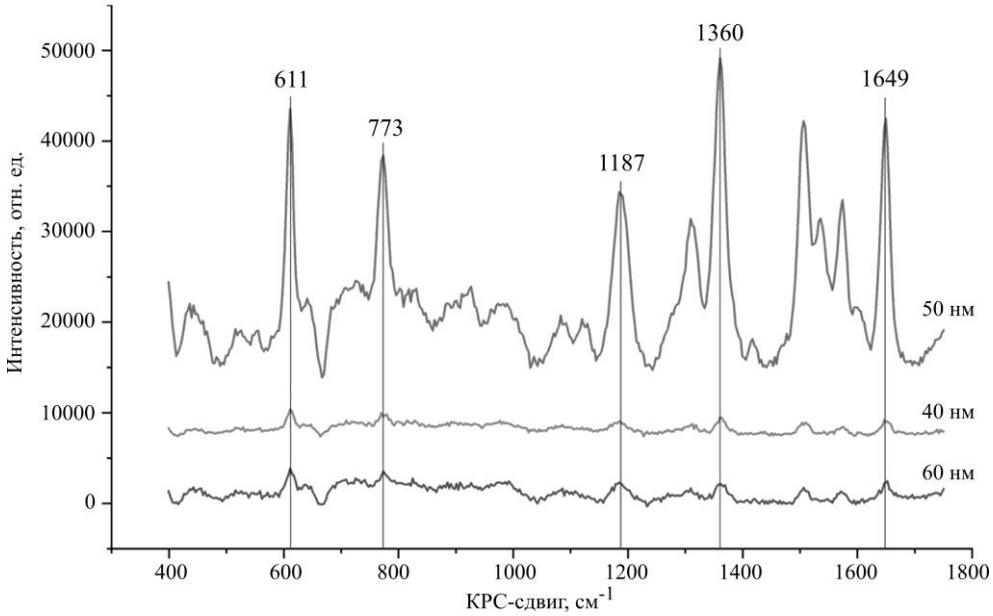


Рис. 3. КРС-спектры 10 мкМ R6G на капиллярах с разной кривизной острия
Fig. 3. SERS spectra of 10 μM R6G on capillaries with different capillary tip curvature

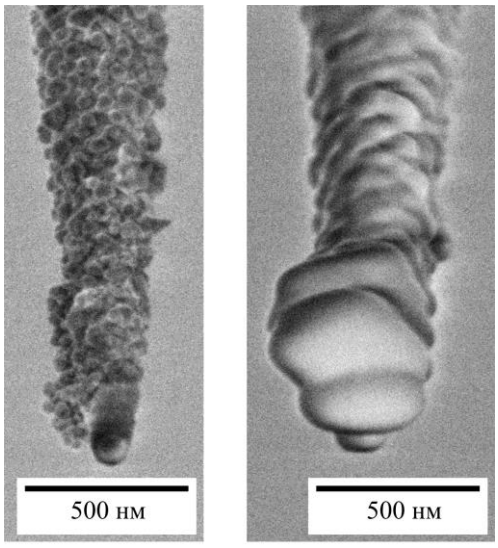


Рис. 4. РЭМ-изображения капилляров с наночастицами Ag с кривизной острия 50 нм через три дня (*а*) и 33 дня (*б*) после изготовления
Fig. 4. SEM images of a capillaries with Ag nanoparticles with 50 nm tip curvature after three days (*a*) and 33 days (*b*) after fabrication

Проведено РЭМ-исследование деградации поверхности капилляров. В течение нескольких дней после изготовления на поверхности капилляра можно было наблюдать дисперсный массив наночастиц серебра с четкими границами (рис. 4, *а*). Как видно из рис. 4, *б*, через 33 дня хранения на воздухе массив наночастиц деградирует, превращаясь в сплошный слой под действием сульфидизации и адсорбции органических амин- и серосодержащих молекул [15–19].

Изучение ГКР-активности капилляров в зависимости от времени и условий хранения показало, что независимо от условий хранения (в эксикаторе или на воздухе) через один месяц интенсивность капилляра становится приблизительно в 3,5 раза меньше, при этом наблюдается падение коэффициента усиления в среднем от $1{,}4 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^4$ (рис. 5). Следует отметить, что

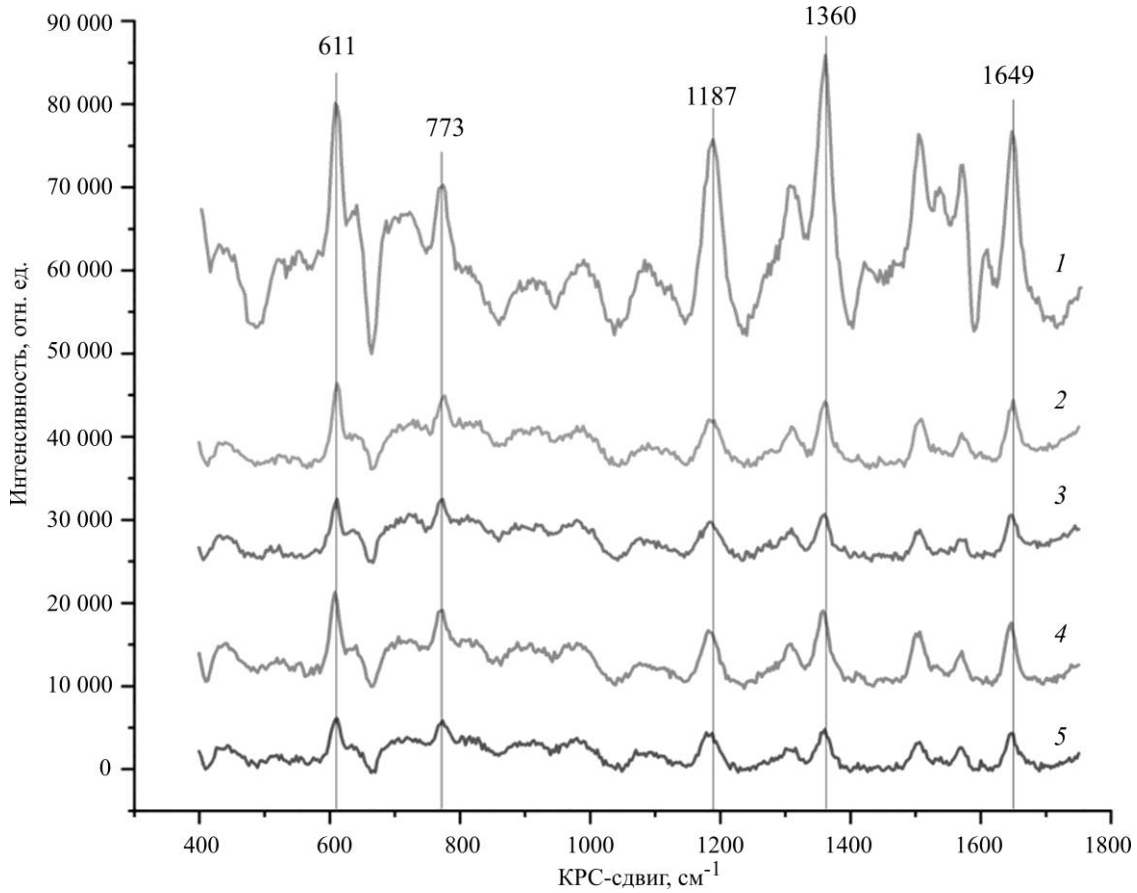


Рис. 5. КРС-спектры 10 мкМ R6G на капиллярах с кривизной острия 50 нм в зависимости от условий и времени хранения: *1* – исходный капилляр; *2, 3* – капилляры через один месяц хранения в эксикаторе и на воздухе соответственно; *4, 5* – капилляры через два месяца хранения в эксикаторе и на воздухе соответственно

Fig. 5. SERS spectra of 10 μM R6G on a capillaries with 50 nm tip curvature as a function of storage conditions and time: *1* – original capillary; *2, 3* – capillaries after one month of storage in a desiccator and in air, respectively; *4, 5* – capillaries after two months of storage in a desiccator and in air, respectively

через два месяца хранения капилляра дальнейшего ухудшения сигнала не происходит. Можно предположить, что массив наночастиц деградирует в течение одного месяца, после чего изменения прекращаются.

В качестве контрольного эксперимента проведено сканирование топографии и механических свойств клеток SH-SY5Y с использованием модифицированного капилляра с кривизной острия 50 нм (рис. 6, *а*, *б*). Ионный ток, протекающий через нанокапилляр, равен 2300 пА, что по расчетной модели соответствует внутреннему радиусу острия 52 нм. Электрический шум составил 1,8 пА. Исследован капилляр с кривизной острия 50 нм, хранившийся в вакууме один месяц после изготовления (рис. 6, *в*, *г*). Ионный ток равен 1970 пА, что при расчетной модели соответствует 45 нм. Электрический шум составил 2,3 пА. Ионный ток, протекающий через капилляр с кривизной острия 50 нм, хранившийся на воздухе один месяц после изготовления (рис. 6, *д*, *е*), намного ниже, чем в других нанокапиллярах. Ток равен 1450 пА, что меньше, чем размеры капилляров до модификации, радиус капилляра по модели соответствует 33 нм, электрический шум составил 2,5 пА, что компенсируется увеличением сет-поинта.

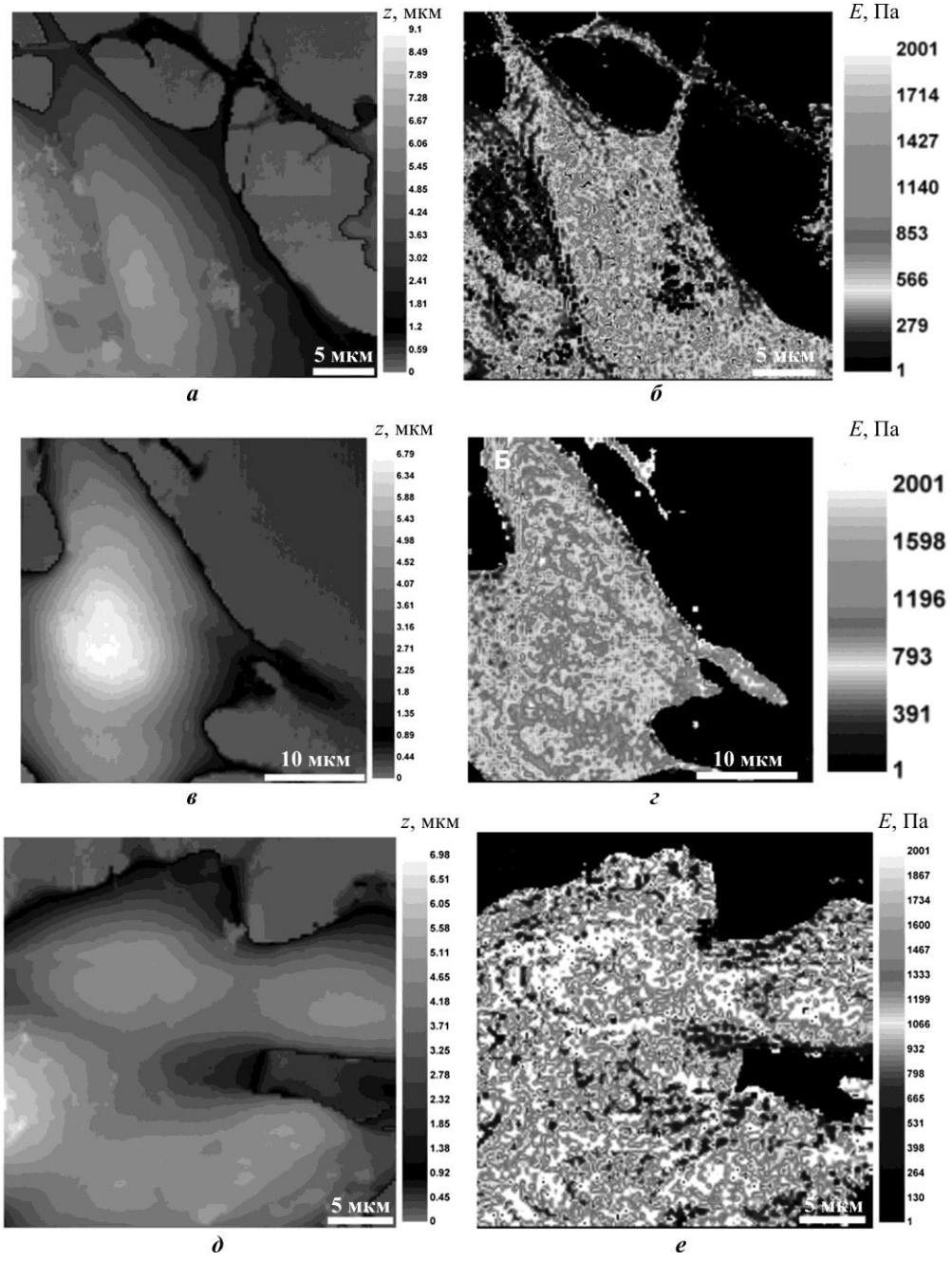


Рис. 6. Топографии (*а, в, д*) и карты модуля Юнга (*б, г, е*) клетки SH-SY5Y, полученные с использованием модифицированных капилляров с кривизной острия 50 нм: *а, б* – исходный капилляр; *в, г* – капилляр через один месяц после изготовления и хранения в вакууме; *д, е* – капилляр через один месяц после изготовления и хранения на воздухе

Fig. 6. Topographies (*a, c, e*) and Young's modulus maps (*b, d, f*) of SH-SY5Y cells obtained using a modified capillaries with a tip curvature of 50 nm: *a, b* – original capillary; *c, d* – capillary used one month after production and storage in vacuum; *e, f* – capillary used one month after production and storage to atmosphere

Получены распределения модуля Юнга для капилляров с кривизной острия 50 нм, хранившихся в разных условиях (рис. 7). Средние значения модуля Юнга совпадают со значениями, которые определены с применением немодифицированных нанокапилляров сопоставимого радиуса (рис. 7, *а*, *б*). Значение модуля Юнга капилляра, хранивше-

гося на воздухе один месяц, значительно больше, чем значения для других капилляров. Это можно объяснить тем, что ток в данном случае ниже ввиду частичной блокировки острия (рис. 7, *в*). Блокировка острия при сохранении исходных геометрических размеров искажает расчет радиуса по теоретической модели, что важно для расчета приложенной силы и давления на поверхность клеток. Отметим, что процесс заполнения капилляров через один месяц после изготовления усложнился.

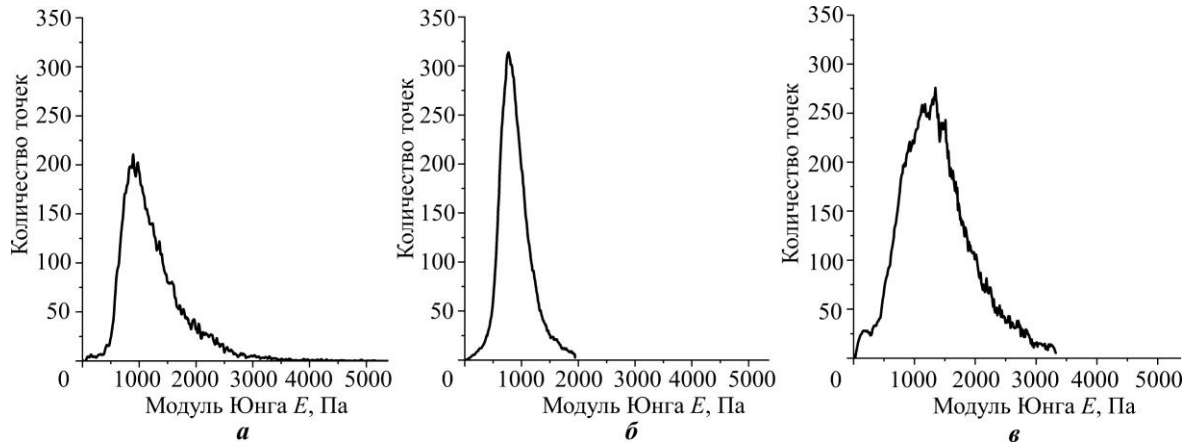


Рис. 7. Гистограммы распределения модуля Юнга для капилляров с кривизной острия 50 нм: *а* – исходный капилляр; *б, в* – капилляры через один месяц после изготовления и хранения в вакууме и на воздухе соответственно

Fig. 7. Histograms of Young's modulus distribution for capillaries with a tip curvature of 50 nm: *a* – original capillary; *b, c* – capillaries used one month after production and storage in a vacuum and in air, respectively

Ионный ток, протекающий через капилляр с кривизной острия 50 нм, хранившийся в вакууме два месяца после изготовления, намного ниже, чем в других капиллярах. Ток составил 1230 пА, что значительно меньше, чем размеры капилляров до модификации. Радиус капилляра по модели соответствует 27 нм, электрический шум 2,5 пА, что компенсируется увеличенем сет-поинта. Пример топографии и карты модуля Юнга представлен на рис. 8.

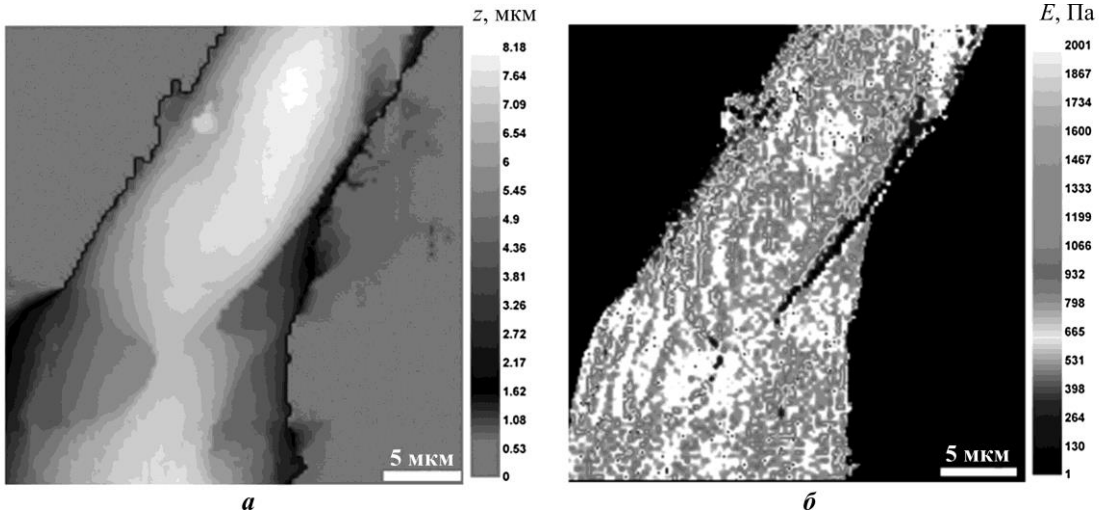


Рис. 8. Топография (*а*) и карта модуля Юнга (*б*) клетки SH-SY5Y, полученные с использованием модифицированного капилляра с кривизной острия 50 нм, хранившегося в вакууме два месяца после изготовления

Fig. 8. Topography (*a*) and Young's modulus map (*b*) of SH-SY5Y cells obtained using a modified nanocapillary with a tip curvature of 50 nm, used two months after production and storage in vacuum

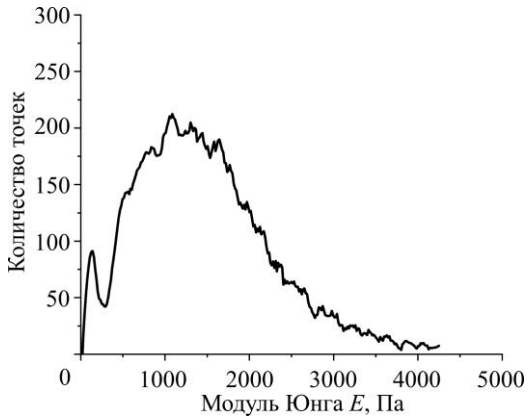


Рис. 9. Гистограмма распределения модуля Юнга для капилляра с кривизной острия 50 нм, хранившегося два месяца в вакууме после изготовления

Fig. 9. Histogram of Young's modulus distribution for capillary with a tip curvature of 50 nm, used two months after production and storage in vacuum

При использовании капилляра, хранившегося два месяца в вакууме, получены аналогичные результаты, как и при использовании капилляра, хранившегося один месяц на воздухе. Однако в первом случае ток ниже (рис. 9).

Капилляр с кривизной острия 50 нм, хранившийся на воздухе два месяца после изготовления, не удалось заполнить раствором Хэнкса. На острие образовался пузырь воздуха, удалить который не получилось.

Заключение. Согласно РЭМ-изображениям наиболее плотный массив (250 частиц/мкм^2 со средним диаметром частиц 51 нм), наибольший коэффициент усиления $1{,}4 \cdot 10^5$ и наилучшее качество спектра демонстрирует капилляр с кривизной 50 нм. Исследование ГКР-активности капилляров от времени и условий хранения выявило, что интенсивность КРС-сигнала через один месяц снижается примерно в 3,5 раза и больше не меняется со временем независимо от условий хранения. Проведенные СИПМ-исследования клеточных культур с использованием капилляров с разными временем и условиями хранения показали, что примерно через два месяца происходит частичная или полная блокировка острия, связанная с деградацией поверхности капилляра. Следовательно, через один месяц заполнение капилляров становится затруднительным.

Литература / References

1. Korchev Yu. E., Gorelik J., Lab M. J., Sviderskaya E. V., Johnston C. L., Coombes Ch. R. et al. Cell volume measurement using scanning ion conductance microscopy. *Biophys. J.* 2000;78(1):451–457. https://doi.org/10.1016/S0006-3495(00)76607-0
2. Gorelkin P., Erofeev A., Kolmogorov V., Efremov Yu., Novak P., Shevchuk A. et al. Scanning ion conductance microscopy (SICM) for low-stress directly examining of cellular mechanics. *Microsc. Microanal.* 2020;26(S2):1968–1970. https://doi.org/10.1017/S1431927620019972
3. Zhuang X., Bartley L. E., Babcock H. P., Russell R., Ha T., Herschlag D., Chu S. A single-molecule study of RNA catalysis and folding. *Science.* 2000;288(5473):2048–2051. https://doi.org/10.1126/science.288.5473.2048
4. Xie X. S., Yu J., Yang W. Y. Living cells as test tubes. *Science.* 2006;312(5771):228–230. https://doi.org/10.1126/science.1127566
5. Takahashi Y., Sasaki Y., Yoshida T., Honda K., Zhou Yu., Miyamoto T. et al. Nanopipette fabrication guidelines for SICM nanoscale imaging. *Anal. Chem.* 2023;95(34):12664–12672. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c01010
6. Sarkar S., Mandler D. Scanning electrochemical microscopy versus scanning ion conductance microscopy for surface patterning. *ChemElectroChem.* 2017;4(11):2981–2988. https://doi.org/10.1002/celc.201700719
7. Schäffer T. E., Anczykowski B., Fuchs H. Scanning ion conductance microscopy. In: Bhushan B., Fuchs H. (eds). *Applied scanning probe methods II: Scanning probe microscopy techniques.* Berlin; Heidelberg: Springer; 2022, pp. 91–119. https://doi.org/10.1007/3-540-27453-7_3
8. Seifert J., Rheinlaender J., Novak P., Korchev Yu. E., Schäffer T. E. Comparison of atomic force microscopy and scanning ion conductance microscopy for live cell imaging. *Langmuir.* 2015;31(24):6807–6813. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b01124

9. Shevchuk A. I., Frolenkov G. I., Sánchez D., James P. S., Freedman N., Lab M. J. et al. Imaging proteins in membranes of living cells by high-resolution scanning ion conductance microscopy. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2006;45(14):2212–2216. https://doi.org/10.1002/anie.200503915
10. Nashimoto Y., Takahashi Y., Ida H., Matsumae Y., Ino K., Shiku H. Nanoscale imaging of an unlabeled secretory protein in living cells using scanning ion conductance microscopy. *Anal. Chem.* 2015;87(5):2542–2545. https://doi.org/10.1021/ac5046388
11. Koya A. N., Zhu X., Ohannesian N., Yanik A. A., Alabastri A., Zaccaria R. P. Nanoporous metals: From plasmonic properties to applications in enhanced spectroscopy and photocatalysis. *ACS Nano.* 2021;15(4):6038–6060. https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10945
12. Bandarenka H. V., Khinevich N. V., Burko A. A., Redko S. V., Zavatski S. A., Shapel U. A. et al. 3D silver dendrites for single-molecule imaging by surface-enhanced Raman spectroscopy. *ChemNanoMat.* 2021;7(2):141–149. https://doi.org/10.1002/cnma.202000521
13. Karooby E., Sahbafar H., Heris M. H., Hadi A., Eskandari V. Identification of low concentrations of flucytosine drug using a surface-enhanced Raman scattering (SERS)-active filter paper substrate. *Plasmonics.* 2024;19(2):855–863. https://doi.org/10.1007/s11468-023-02042-1
14. Dubkov S., Overchenko A., Novikov D., Kolmogorov V., Volkova L., Gorelkin P. et al. Single-cell analysis with silver-coated pipette by combined SERS and SICM. *Cells.* 2023;12(21):2521. https://doi.org/10.3390/cells12212521
15. Fletcher N. D., Lieb H. C., Mullaugh K. M. Stability of silver nanoparticle sulfidation products. *Sci. Total Environ.* 2019;648:854–860. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.239
16. Zienkiewicz-Strzalka M., Blachnio M. Nitrogenous bases in relation to the colloidal silver phase: Adsorption kinetic, and morphology investigation. *Appl. Sci.* 2023;13(6):3696. https://doi.org/10.3390/app13063696
17. Roldán M. V., Pellegri N. S., Sanctis O. A. de. Optical response of silver nanoparticles stabilized by amines to LSPR based sensors. *Procedia Mater. Sci.* 2012;1:594–600. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.080
18. Lugaresi O., Perales-Rondón J. V., Minguzzi A., Solla-Gullón J., Rondini S., Feliu J. M., Sánchez-Sánchez C. M. Rapid screening of silver nanoparticles for the catalytic degradation of chlorinated pollutants in water. *Appl. Catal., B.* 2015;163:554–563. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.08.030
19. Keast V. J. Corrosion processes of silver nanoparticles. *Appl. Nanosci.* 2022;12(6):1859–1868. https://doi.org/10.1007/s13204-022-02462-1

Информация об авторах

Новиков Денис Вадимович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tororo@bk.ru

Чумаченко Юлия Вячеславовна – инженер научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), julia.chumachenko@mail.ru

Дубков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, директор Института перспективных материалов и технологий, начальник научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sv.dubkov@gmail.com

Колмогоров Василий Сергеевич – инженер научно-исследовательской лаборатории биофизики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4); младший научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (Россия, 119991, г. Москва, ул. Колмогорова, 1), vskolmogorov@gmail.com

Горелкин Петр Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биофизики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4), gorelkin.pv@misis.ru

Ерофеев Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, заведующий НИЛ биофизики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4), erofeev.as@misis.ru

Пархоменко Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4), parkh@rambler.ru

Волкова Лидия Сергеевна – инженер научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1); младший научный сотрудник отдела структурного анализа и метрологии Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 115487, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), lidiya.volkova.96@mail.ru

Железнякова Анастасия Вячеславовна – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), stushka@bk.ru

Попенко Виталий Федорович – кандидат химических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vitpopenko@yandex.ru

Information about the authors

Denis V. Novikov – Junior Researcher of the Research Laboratory “Photonic Sensors and Plasmonic Materials”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tororo@bk.ru

Julia V. Chumachenko – Engineer of the Research Laboratory “Photonic Sensors and Plasmonic Materials”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), julia.chumachenko@mail.ru

Sergey V. Dubkov – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Advanced Materials and Technologies, Head of the Research Laboratory “Photonic Sensors and Plasmonic Materials”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sv.dubkov@gmail.com

Vasiliy S. Kolmogorov – Engineer of the Research Laboratory of Biophysics, National University of Science and Technology “MISiS” (Russia, 119049, Moscow, Leninsky ave., 4); Junior Researcher of the Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Russia, Moscow, 119991, Kolmogorov st., 1), vskolmogorov@gmail.com

Peter V. Gorelkin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Research Laboratory of Biophysics, National University of Science and Technology “MISiS” (Russia, 119049, Moscow, Leninsky ave., 4), gorelkin.pv@misis.ru

Alexander S. Erofeev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Research Laboratory of Biophysics, National University of Science and Technology "MISiS" (Russia, 119049, Moscow, Leninsky ave., 4), erofeev.as@misis.ru

Yuri N. Parkhomenko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISiS" (Russia, 119049, Moscow, Leninsky ave., 4), parkh@rambler.ru

Lidia S. Volkova – Engineer of the Research Laboratory "Photonic Sensors and Plasmonic Materials", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1); Junior Researcher of the Structural Analysis and Metrology Department, Institute of Nanotechnology and Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 115487, Moscow, Leninsky ave., 32A), lidiya.volkova.96@mail.ru

Anastasia V. Zheleznyakova – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), stushka@bk.ru

Vitaliy F. Popenko – Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vitpopenko@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 27.11.2024
Поступила после рецензирования / Revised 31.01.2025
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

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

Полные тексты статей журнала с 2004 по 2024 гг. доступны на сайте Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 519.857.3:621.3.049.76
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-754-762
EDN: FZCGGH

Модель принятия решений в управлении производством микроэлектроники на основе марковских процессов и уравнений Колмогорова

***Ю. С. Шевнина*[1*], *Л. Г. Гагарина*[1], *С. Ф. Царапкин*[1], *М. Ю. Семенов*[2], *Е. И. Минаков*[3], *Е. М. Портнов*[1]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*ООО «НМ-Тех», г. Москва, Россия*
[3]*Тульский государственный университет, г. Тула, Россия*

[*] *yusm@rambler.ru*

Аннотация. При управлении производством микроэлектронных компонентов возникает основная проблема – отсутствие действенных методов выбора оптимальных вариантов с учетом целей, приоритетов, рисков, возможностей и ограничений производства. В работе представлена математическая модель, описывающая процесс принятия решения при управлении производством микроэлектронных компонентов. Производство представлено алгебраической системой, в состав которой входят описания состояния процессов и причинно-следственные связи между ними. В качестве альтернативы для принятия решений использованы состояния производственного процесса, доступные для перехода из текущего состояния с учетом связей, определенных в алгебраической системе. Критерием выбора варианта перехода между состояниями выступает максимальное время пребывания в стационарном режиме производства микроэлектронных компонентов с требуемыми характеристиками. Кроме того, процесс моделируется как марковский, что позволяет применять вероятностный подход с использованием дифференциальных уравнений Колмогорова для описания его поведения. Исследование возможных переходов между состояниями позволило сформировать траектории, ускоряющие процедуру принятия решения и адаптирующие модель к интеллектуальным системам управления производством микроэлектронных компонентов. Математическая модель, основанная на уравнениях Колмогорова, обеспечивает не только вычисление вероятностного распределения процесса во времени, но и распределение длительности пребывания в разных состояниях в ста-

© Ю. С. Шевнина, Л. Г. Гагарина, С. Ф. Царапкин, М. Ю. Семенов, Е. И. Минаков, Е. М. Портнов, 2025

ционарной фазе. Полученные результаты способствуют разработке эффективных и качественных решений на всех уровнях контроля изготовления микроэлектронных компонентов.

Ключевые слова: управление производством, марковские процессы, уравнения Колмогорова, вероятностный подход

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00530).

Для цитирования: Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Царапкин С. Ф., Семенов М. Ю., Минаков Е. И., Портнов Е. М. Модель принятия решений в управлении производством микроэлектроники на основе марковских процессов и уравнений Колмогорова. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):754–762. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-754-762. EDN: FZCGGH.

Original article

A decision-making model in microelectronics production management based on Markov processes and Kolmogorov equations

Yu. S. Shevnina[1*], L. G. Gagarina[1], S. F. Tsarapkin[1], M. Yu. Semenov[2], E. I. Minakov[3], E. M. Portnov[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]"NM-Tech" LLC, Moscow, Russia
[3]Tula State University, Tula, Russia

[*] *yusm@rambler.ru*

Abstract. The main problem in the microelectronic components production management is the lack of effective decision-making methods with account for the goals, priorities, risks, capabilities and limitations of production. In this work, a mathematical model describing the decision making in the management of microelectronic components production is presented. The production process is represented by an algebraic system consisting of descriptions of production process states and cause-and-effect relations between them. As an alternative for decision making, production process states were used that are available for transition from current state with account for links defined in algebraic system. State transition option selection criterion is maximal time of staying in stationary mode of microelectronic components production management with required characteristics. In addition, the production process was represented as a Markov process, which allows the application of a probabilistic approach to describing its behavior using Kolmogorov differential equations. The study of possible transitions between the states has made it possible to form trajectories accelerating the decision making and adapting the developed mathematical model for use in intelligent production management systems. The mathematical model based on Kolmogorov differential equations allows obtaining not only the probability distribution of processes as a function of time, but also the distribution of the duration of stay in various states in stationary phase. The results obtained contribute to the development of effective and high-quality solutions at all levels of microelectronic component production control.

Keywords: production management, Markov processes, Kolmogorov equations, probabilistic approach

Funding: the work has been supported by the the Russian Science Foundation (project no. 24-29-00530).

For citation: Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Tsarapkin S. F., Semenov M. Yu., Minakov E. I., Portnov E. M. A decision-making model in microelectronics production management based on Markov processes and Kolmogorov equations. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):754–762. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-754-762.

Введение. Качественное управление производством микроэлектронных компонентов позволяет повысить эффективность распределения финансовых, сырьевых и энергетических ресурсов, увеличить процент выхода годных изделий, снизить сроки изготовления продукции [1]. Основной элемент управления – процесс принятия решения, при котором учитываются цели, приоритеты, риски, возможности и ограничения производства микроэлектронных компонентов.

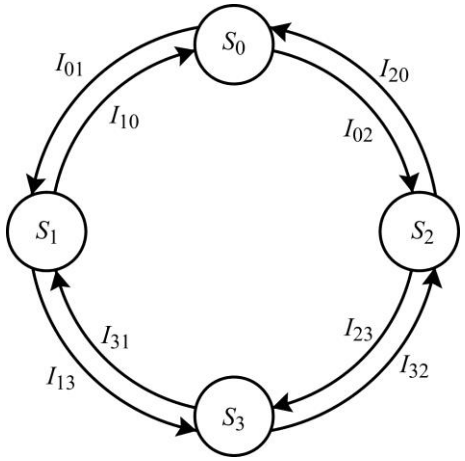
Цель настоящей работы – разработка математической модели для повышения эффективности принятия решения при управлении производством, исходя из состояния процесса и факторов, влияющих на принятие решения.

Описание производства как марковского процесса. Принятие решений основано на контроле и оценке состояния объектов, входящих в контур управления и выявляемых при построении иерархической структуры производственного процесса [2, 3]. Таким образом, производственный процесс представляет собой алгебраическую систему *E*:

$$E = \left\langle O_i, O_j, R_{ij} \right\rangle, i, j \in \mathbb{N},$$

где O – объект производственного процесса; R – отношение между двумя объектами.

Производственный процесс является случайным с дискретными состояниями S_1, S_2, S_3, … и непрерывным временем. При этом для любого момента времени t_0 вероятностные характеристики производства зависят только от состояния объектов в текущий момент времени t_0 и не зависят от того, когда и как данное состояние наступило. Следовательно, производственный процесс может быть отнесен к марковским процессам. Докажем это. Пусть в момент времени t_0 i-й объект производственного процесса находится в состоянии S_0. Переход объекта в момент времени $t > t_0$ в состояние S_1 зависит от состояния S_0, но не зависит от того, в какие моменты времени t_1 ($t_0 < t_1 < t$) наступали другие состояния объекта, что соответствует определению марковского процесса [4, 5].



Граф дискретных состояний *S* производственного процесса (*I* – интенсивность потока событий)

Production process discrete state *S* graph (*I* – the intensity of the event blow)

Для анализа производственного процесса как марковского построим граф его дискретных состояний (рисунок). Для удобства рассмотрим два объекта из контура управления, состояние которых может выйти за допустимые значения. При этом корректировка состояния начинается мгновенно и продолжается в течение случайного времени.

Рассмотрим возможные состояния производственного процесса: S_0 – оба объекта работают в штатном режиме; S_1 – состояние первого объекта корректируется, второй объект работает в штатном режиме; S_2 – первый объект работает в штатном режиме, состояние второго объекта корректируется; S_3 – состояние обоих объектов корректируется. Следует обратить внимание на то, что переход из состояния S_0 в состояние S_3 и из S_1 в S_2 не исследуется, так как выход состояний объектов за пределы допустимых значений независимы друг от друга и вероятностями одновременного изменения состояния объектов или окончания корректировки состояния объектов можно пренебречь.

Для классификации состояний производственного процесса и формирования траектории прохождения процесса составлена постоянно пополняемая база знаний, представляющая собой ориентированный граф $G(V,E), V \neq \varnothing, E \subset V \times V \wedge \forall e \in E : |e| = 2$. Вершинами графа являются возможные состояния производственного процесса микроэлектронных компонентов, а ребрами – траектории по переходу из одного состояния в другое. Каждой вершине поставлено в соответствие нечеткое множество, определяющее условия перехода в данное состояние. Использование ориентированного графа для построения базы знаний о состояниях производственного процесса позволяет контролировать поведение процесса, делает базу знаний универсальной и адаптируемой под меняющиеся условия.

Поток событий производственного процесса. Основная характеристика потока событий – интенсивность или среднее число событий за единицу времени. Исходя из данного утверждения получим, что переход из состояния S_i в состояние S_j осуществляется вследствие наступления событий с интенсивностью I_{ij}. Таким образом, выход состояния первого объекта за пределы допустимых значений является событием для перехода производственного процесса из состояния S_0 в состояние S_1; окончание корректировки состояния первого объекта – из S_1 в S_0. Изменение состояния для второго объекта происходит аналогично. При этом в любой момент времени t сумма вероятностей всех состояний производственного процесса равна единице:

$$\sum_{i=0}^{n-1} p_i(t) = 1, \qquad (1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность i-го состояния производства в момент времени t; n – количество возможных состояний (для данного примера $n = 4$).

Рассмотрим производственный процесс в момент времени t и через малый промежуток времени dt, за который возможно изменение состояния. Нахождение процесса в состоянии S_0 в момент времени $t + dt$ возможно в двух случаях:

– производственный процесс за время dt не перешел в новое состояние, а остался в состоянии S_0, в котором находился в момент времени t с вероятностью $p_0(t)$. Очевидно, что для смены состояния производственного процесса необходим поток событий с интенсивностью $I_{01} + I_{02}$, при этом вероятность смены состояния равна $(I_{01} + I_{02})dt$, а вероятность того, что состояние не изменится, составляет $1 - (I_{01} + I_{02})dt$. Тогда вероятность нахождения производственного процесса в состоянии S_0 равна: $p_0(t) \cdot (1 - (I_{01} + I_{02})dt)$;

– производственный процесс за время dt перешел в состояние S_0 из состояний S_1 или S_2, в которых находился с вероятностями $p_1(t)$ и $p_2(t)$ соответственно. Переход производственного процесса из состояния S_1 в состояние S_0 осуществляется при интенсивности потока событий I_{10} с вероятностью $I_{10}dt$. Вероятность нахождения производственного процесса в состоянии S_0 равна $p_1(t)I_{10}dt$.

Применяя аналогичные рассуждения для перехода процесса из состояния S_2 в состояние S_0, получаем

$$p_0(t+dt) = p_1(t)I_{10}dt + p_2(t)I_{20}dt + p_0(t)\left(1-\left(I_{01}+I_{02}\right)dt\right)$$

или в дифференциальных уравнениях первого порядка:

$$p_0' = I_{10}p_1 + I_{20}p_2 - \left(I_{01}+I_{02}\right)p_0.$$

С учетом переходов между другими состояниями производственного процесса составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний:

$$\begin{cases} p_0' = I_{10}p_1 + I_{20}p_2 - \left(I_{01}+I_{02}\right)p_0, \\ p_1' = I_{01}p_0 + I_{31}p_3 - \left(I_{10}+I_{13}\right)p_1, \\ p_2' = I_{02}p_0 + I_{32}p_3 - \left(I_{20}+I_{23}\right)p_2, \\ p_3' = I_{13}p_1 + I_{23}p_2 - \left(I_{31}+I_{32}\right)p_3. \end{cases} \quad (2)$$

Решение уравнений (2) позволит получить все вероятности состояний производственного процесса как функции времени. Однако для решения требуется определить начальные условия $p_0(0)=1$, $p_1(0)=p_2(0)=p_3(0)=0$ и учитывать равенство (1).

Решение задач управления производством микроэлектронных компонентов требует детального рассмотрения технологического процесса не только в текущем состоянии, но и в долгосрочной перспективе (при $t\to\infty$). Для этого необходимо определить предельные вероятности состояний производства, что позволит оценить его устойчивость, эффективность и качество управления.

Предельные вероятности состояний производственного процесса являются постоянными величинами, следовательно, их производные равны нулю. Тогда система уравнений (2) имеет вид

$$\begin{cases} \left(I_{01}+I_{02}\right)p_0 = I_{10}p_1 + I_{20}p_2, \\ \left(I_{10}+I_{13}\right)p_1 = I_{01}p_0 + I_{31}p_3, \\ \left(I_{20}+I_{23}\right)p_2 = I_{02}p_0 + I_{32}p_3, \\ \left(I_{31}+I_{32}\right)p_3 = I_{13}p_1 + I_{23}p_2. \end{cases}$$

Для системы с конечным числом состояний предлагается использовать следующий алгоритм для составления системы уравнений:

1. Обозначить предельные вероятности состояний как p_i, $i=0,1,...,n-1$, где n – количество состояний в системе.

2. Составить уравнения баланса вероятностей для каждого состояния. Уравнение для *i*-го состояния будет иметь вид

$$\sum_{j=0}^{n-1} I_{ij} p_i = \sum_{j=0}^{n-1} I_{ji} p_j , \quad i \neq j .$$

3. Добавить равенство (1).

4. Решить полученную систему уравнений для определения значений предельных вероятностей состояний.

Для систем с бесконечным числом состояний применяются аналогичные принципы, но с использованием более сложных математических методов, таких как метод стационарного распределения или метод моментов.

Рассмотрим пример производственного процесса, граф состояний которого аналогичен графу, изображенному на рисунке. Значения интенсивностей потоков событий, обусловливающих переходы между состояниями, равны: $I_{01} = 1$, $I_{02} = 2$, $I_{10} = 2$, $I_{13} = 2$, $I_{20} = 3$, $I_{23} = 1$, $I_{31} = 3$, $I_{32} = 2$.

Составив и решив систему уравнений

$$\begin{cases} 3p_0 = 2p_1 + 3p_2, \\ 4p_1 = p_0 + 3p_3, \\ 4p_2 = 2p_0 + 2p_3, \\ p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1, \end{cases}$$

получим $p_0 = 0,4$, $p_1 = 0,2$, $p_2 = 0,27$, $p_3 = 0,13$.

Таким образом, в стационарном режиме данный производственный процесс будет работать в штатном режиме 40 % времени, в состоянии выхода за допустимые пределы первого объекта – 20 %, второго – 27 %. Время выхода из строя обоих объектов составляет 13 %. Анализируя полученные результаты с точки зрения управления производством, можно сделать вывод о необходимости увеличения штатного режима работы производственного процесса за счет дублирования объектов или усиления контроля за их состоянием в допустимых значениях.

Заключение. Применение вероятностного подхода и дифференциальных уравнений Колмогорова к моделированию принятия решения при управлении производством микроэлектронных компонентов позволяет получить распределение не только вероятностей процессов как функции времени, но и времени пребывания производственного процесса в возможных состояниях в стационарном режиме. Полученные результаты делают возможным принимать эффективные и качественные решения на всех уровнях управления производством микроэлектронных компонентов.

Литература / References

1. Орлов А. И. О четырех направлениях исследований в области теории и практики управления производственными системами. *Научный журнал КубГАУ*. 2022;(178):293–319. https://doi.org/10.21515/1990-4665-178-025. EDN: KNIHIU.
Orlov A. I. About four directions of research in the field of theory and practice of management of production systems. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2022;(178):293–319. (In Russ.). https://doi.org/10.21515/1990-4665-178-025

2. Шевнина Ю. С. Метод декомпозиции сложной нелинейной системы на основе процессного подхода. *Системы управления и информационные технологии.* 2021;(3):24–29. https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.85.3.005. EDN: JMTOUR.
Shevnina Ju. S. Decomposition method for a complex nonlinear system based on a process approach. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii.* 2021;(3):24–29. (In Russ.). https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.85.3.005
3. Шевнина Ю. С. Иерархическая модель нелинейной динамической системы. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки.* 2021;(8):135–139. https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.08.40. EDN: UELLUZ.
Shevnina Yu. S. Hierarchical model nonlinear dynamic system. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice, series Natural and Technical Sciences.* 2021;(8):135–139. (In Russ.). https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.08.40
4. Шевнина Ю. С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных. *Изв. вузов. Электроника.* 2022;27(3):407–415. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415. EDN: BZRDEB.
Shevnina Ju. S. Method for estimating the state of a nonlinear system based on logical data analysis. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2022;27(3):407–415. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415
5. Клименко Ю. А., Львович Я. Е., Преображенский А. П. Проектирование контрольно-измерительных компонент распределительных энергетических систем. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):88–97. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-88-97. EDN: RZSDQA.
Klimenko Yu. A., Lvovich Y. E., Preobrazhensky A. P. Design of instrumentation and control components of power distribution systems. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):88–97. (In Russ.). https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-88-97
6. Шарамет А. В. Решение задачи предварительного разбиения разнородных данных на классы в условиях ограниченного объема. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2024;(1):62–69. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-62-69. EDN: WCKHAQ.
Sharamet A. V. Solving the problem of preliminary partitioning of heterogeneous data into classes in conditions of limited volume. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2024;(1):62–69. (In Russ.). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-62-69
7. Дымова О. О. Принятие управленческих решений как основа функционирования предприятия. *Мировая наука.* 2019;(7):108–111. EDN: KWSDPX.
Dymova O. O. Decision-making process as basis of the enterprise's working. *Mirovaya nauka = World Science.* 2019;(7):108–111. (In Russ.).
8. Антонов В. В., Конев К. А. Усовершенствование ситуационной методологии разработки систем поддержки принятия решений для предприятий. *Онтология проектирования.* 2022;12(4):547–561. https://doi.org/10.18287/2223-9537-2022-12-4-547-561. EDN: UVKUWM.
Antonov V. V., Konev K. A. Improving the situational methodology for developing decision support systems for enterprises. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing.* 2022;12(4):547–561. (In Russ.). https://doi.org/10.18287/2223-9537-2022-12-4-547-561
9. Подоплелова Е. С. Анализ методов многокритериального принятия решений на примере задачи ранжирования. *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2023;(3):118–125. https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-118-125. EDN: QWZEBE.
Podoplelova E. S. Selection of multi-criteria analysis methods on the example of the problem of ranking. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences.* 2023;(3):118–125. (In Russ.). https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-118-125
10. Козлов С. В., Кубанков А. Н., Шабанов А. П. Модуль принятия решений по интеллектуальной поддержке наукоемких производств. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли.* 2022;14(2):36–43. https://doi.org/10.36724/2409-5419-2022-14-2-36-43. EDN: SVLJXL.
Kozlov S. V., Kubankov A. N., Shabanov A. P. Decision-making module for intellectual support of high-tech industries. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High Technologies in Earth Space Research.* 2022;14(2):36–43. (In Russ.). https://doi.org/10.36724/2409-5419-2022-14-2-36-43
11. Коротков В. В. Информационное моделирование технологических процессов с применением цепей массового обслуживания. *Вестник Астраханского государственного технического университета.*

Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022;(3):16–21. https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-16-21. EDN: VGFUIC.
Korotkov V. V. Information modeling technological processes by using queuing chains. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2022;(3):16–21. (In Russ.). https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-16-21

12. Кристалинский В. Р., Лютикас П. Л., Пахомов Е. И. Об исследовании имитационной математической модели сложной технической системы в современных системах компьютерной математики. *Современные информационные технологии и ИТ-образование.* 2022;18(2):391–403. https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.391-403. EDN: IDYPIG.
Kristalinskii V. R., Luticas P. L., Pachomov E. I. About the study of a simulation mathematical model of a complex technical system in modern systems of computer mathematics. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education.* 2022;18(2):391–403. (In Russ.). https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.391-403
13. Полховская А. В., Данилюк Е. Ю., Моисеева С. П., Бобкова О. С. Вероятностная модель системы совместного доступа с коллизиями, *h*-настойчивостью и отказами. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика.* 2022;(58):35–46. https://doi.org/10.17223/19988605/58/4. EDN: FDPKYA.
Polkhovskaya A. V., Danilyuk E. Yu., Moiseeva S. P., Bobkova O. S. The probabilistic model of sharing system with collisions, *h*-persistence and rejections data processing. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science.* 2022;(58):35–46. (In Russ.). https://doi.org/10.17223/19988605/58/4
14. Колмогорова С. С., Голубятникова Н. О. О применении регуляризации структуры больших данных для распределенной системы сбора и прогнозирования параметров объектов наблюдений. *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2022;18(5):91–99. https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.18.5.012. EDN: ZDQFUO.
Kolmogorova S. S., Golubyatnikova N. O. On the application of big data structure regularization in a distributed evaluation system for emergency parameters. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University.* 2022;18(5):91–99. (In Russ.). https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.18.5.012
15. Леонтьев А. С., Тимошкин М. С. Математические модели оценки показателей надежности для исследования вероятностно-временных характеристик многомашинных комплексов с учетом отказов. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2023;(1):18. https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.27. EDN: XJCMZG.
Leontev A. S., Timoshkin M. S. Mathematical models for evaluating reliability indicators to study the probabilistic and temporal characteristics of multi-machine complexes with regard to failures. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal.* 2023;(1):18. (In Russ.). https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.27

Информация об авторах

Шевнина Юлия Сергеевна – доктор технических наук, профессор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yusm@rambler.ru

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

Царапкин Сергей Федорович – магистрант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), cpintex@yandex.ru

Семенов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, директор Научно-технического центра ООО «НМ-Тех» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), semenov@nm-tech.org.ru

Минаков Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92), eminakov@bk.ru

Портнов Евгений Михайлович – доктор технических наук, профессор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), evgen_uis@mail.ru

Information about the authors

Yulia S. Shevnina – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yusm@rambler.ru

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Systems and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gagar@bk.ru

Sergey F. Tsarapkin – Master's degree student of the Institute of Systems and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), cpintex@yandex.ru

Mikhail Yu. Semenov – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Technical Center, "NM-Tech" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya pkwy, 6), semenov@nm-tech.org.ru

Evgeniy I. Minakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Radio Electronics Department, Tula State University (Russia, 300012, Tula, Lenin ave., 92), eminakov@bk.ru

Evgeniy M. Portnov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), evgen_uis@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 19.09.2024
Поступила после рецензирования / Revised 10.10.2024
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

Научная статья
УДК 621.376.9
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-763-773
EDN: IQJUUI

Способ двойного спектрального анализа и взвешенной обработки квазинепрерывных сигналов при отсутствии априорных сведений об их параметрах

Р. В. Смолин*, И. А. Баландин, А. М. Лаврентьев, Е. Е. Андрющенков

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны Министерства обороны Российской Федерации, г. Ярославль, Россия

* *anatory@bk.ru*

Аннотация. В современных летательных аппаратах для обеспечения профильного полета используются бортовые радионавигационные системы когерентно-импульсного типа, при обнаружении излучения которых расширяются возможности радиолокационных комплексов. Основные недостатки реализации таких систем заключаются в необходимости применения энергетического обнаружителя, что обусловлено отсутствием априорных сведений о характеристиках излучения, и повышения эффективности радиометрического способа при обнаружении маломощных сигналов бортовых радиоэлектронных средств когерентно-импульсного типа при их излучении с расстояний, соответствующих границам прямой видимости, ввиду недостаточного отношения сигнал/шум на входе устройства принятия решения. В работе предложен способ двойного спектрального анализа и взвешенной обработки квазинепрерывных сигналов при отсутствии априорных сведений об их параметрах. Показано, что предложенный способ позволяет при фиксированных значениях условной вероятности ложной тревоги достигать требуемых характеристик обнаружения. Оценка эффективности разработанного способа проведена на имитационной модели в пакете прикладных программ Matlab. Применение квазиоптимальной обработки квазинепрерывных регулярных последовательностей радиоимпульсов увеличивает отношение сигнал/шум на входе устройства принятия решения по сравнению с энергетическим обнаружителем и, следовательно, повышает дальность обнаружения летательных аппаратов.

Ключевые слова: средства пассивной локации, радиоэлектронные системы, летательные аппараты, квазинепрерывные регулярные последовательности радиоимпульсов, автокорреляционная функция, АКФ, низкая энергетическая доступность, дискретное преобразование Фурье, взвешивающая функция

Для цитирования: Смолин Р. В., Баландин И. А., Лаврентьев А. М., Андрющенков Е. Е. Способ двойного спектрального анализа и взвешенной обработки квазинепрерывных сигналов при отсутствии априорных сведений об их параметрах. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):763–773. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-763-773. EDN: IQJUUI.

© Р. В. Смолин, И. А. Баландин, А. М. Лаврентьев, Е. Е. Андрющенков, 2025

Original article

A technique of double spectral analysis and weighted processing of quasi-continuous signals in the absence of a priori information about their parameters

R. V. Smolin**, *I. A. Balandin, A. M. Lavrentiev, E. E. Andryushchenkov

Yaroslavl Higher Military Institute of the Air Defense of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Yaroslavl, Russia

* *anatory@bk.ru*

Abstract. A wide class of modern aircrafts uses onboard radio navigation systems of coherent-pulse type to ensure terrain-following flight, the detection of radiation of which expands the capabilities of radar facilities. The main difficulties in this case are the need to use an energy detector, due to the lack of a priori information about radiation characteristics, and low efficiency of radiometric technique in detecting low-power signals of onboard coherent-pulse type radio electronic means when they are emitted from distances corresponding to the boundaries of line of sight, because of insufficient signal-to-noise ratio at the input of the decision-making device. In this work, a technique of dual spectral analysis and weighted processing of quasi-continuous signals in the absence of a priori information about their parameters is proposed. It has been demonstrated that the proposed technique allows for the required detection characteristics achievement at fixed values of the conditional probability of false alarm. Evaluation of the developed technique efficiency was carried out on a simulation model in the Matlab application program package. The use of quasi-optimal processing of quasi-continuous regular radio impulse trains increase the signal-to-noise ratio of the decision-making device compared to an energy detector and hence extends the aircraft detection range.

Keywords: passive location means, radio electronic systems, aircraft, quasi-continuous regular sequences of radio pulses, autocorrelation function, ACF, quasi-continuous signals, low energy availability, discrete Fourier transform, weighting function

For citation: Smolin R. V., Balandin I. A., Lavrentiev A. M., Andryushchenkov E. E. A technique of double spectral analysis and weighted processing of quasi-continuous signals in the absence of a priori information about their parameters. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):763–773. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-763-773.

Введение. В связи с широким распространением беспилотных летательных аппаратов возрастает вероятность их негативного влияния на организацию безопасного воздушного движения. Для повышения уровня безопасности воздушного движения в контролируемых границах воздушного пространства требуется обнаружение и местоопределение летательных аппаратов нарушителей на максимальной дальности. Однако обнаружение малоразмерных летательных аппаратов, осуществляющих полет на малых и предельно малых высотах, обзорными радиолокационными станциями является сложной и нередко неразрешимой задачей.

В настоящей работе рассматривается способ двойного спектрального анализа и взвешенной обработки квазинепрерывных сигналов при отсутствии априорных сведений об их параметрах и дается оценка его эффективности.

Средства пассивной локации. Альтернативный способ обнаружения летательных аппаратов – пеленгование их радиоизлучения средствами пассивной локации, связанными с радиолокационными станциями единым информационным полем в радиолокационный комплекс [1]. В широком классе современных летательных аппаратов для обеспечения профильного полета используются бортовые радионавигационные системы когерентно-импульсного типа, обнаружение излучения которых позволяет расширить возможности радиолокационных комплексов в целом. Зондирующие сигналы таких радионавигационных систем представляют собой квазинепрерывные регулярные последовательности радиоимпульсов (КРПР) [2].

Модель входной реализации $y(t)$, включающая в себя аддитивную смесь КРПР и внутриканальных шумов (рис. 1), может быть описана выражением

$$y(t) = S_{\text{КРПР}}(t) + n_0(t),$$

где $S_{\text{КРПР}}(t)$ – модель квазинепрерывной регулярной импульсной последовательности полезного сигнала; $n_0(t)$ – модель внутриканальных шумов приемного устройства средства пассивной локации; t – расчетное время.

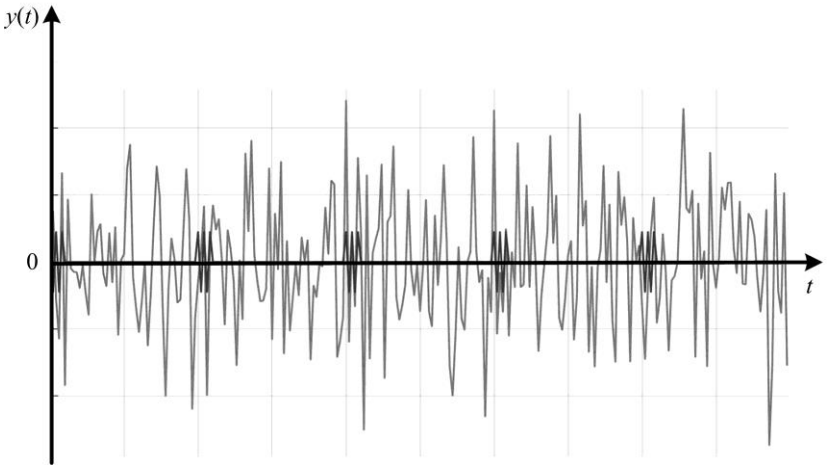


Рис. 1. Модель входной реализации: ——— импульсная последовательность полезного сигнала; ——— внутриканальные шумы приемного устройства средства радиомониторинга

Fig. 1. Input implementation model: ——— pulse sequence of the useful signal; ——— intra-channel noise of the receiver unit of the radio monitoring device

Типовая структура сигналов бортовых радионавигационных систем когерентно-импульсного типа имеет следующий вид:

$$S_{\text{КРПР}}(t) = U_m \left[\sum_{n_{\text{и}}=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t - n_{\text{и}} T_{\text{п}}}{\tau_{\text{и}}} \right) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где U_m – амплитуда сигнала; $n_{\text{и}}$ – номер импульса; $T_{\text{п}}$ – период следования импульсов; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса; ω_0 – несущая частота; φ_0 – начальная фаза.

Помеховая обстановка задается собственным шумом приемника в виде аддитивного дискретного гауссового белого шума:

$$n_0(\tau) = \sigma_n^2 Z_n,$$

где σ_n^2 – дисперсия помехи; Z_n – числа, нормально распределенные на интервале [0,1].

В средствах пассивной локации применяется множество разных способов обработки сигналов, особенностями которых являются снижение требований к априорным сведениям о параметрах разведываемых сигналов и повышение декорреляции собственного шума приемника [3]. Однако такой подход исключает возможности эффективного накопления сигналов и, как следствие, не позволяет обнаруживать маломощные либо энергетически скрытные сигналы. К ним можно отнести КРПР, излученные с дальностей, соответствующих радиогоризонту [3].

Согласованный способ обработки КРПР, основанный на применении корреляционно-фильтрового обнаружителя, напротив, дает возможность обнаруживать источник излучения на требуемых дальностях [3]. Однако для его реализации требуется перекрытие широкого диапазона параметров зондирующих сигналов, применяемых в бортовых радионавигационных системах когерентно-импульсного типа, таких как несущая частота f_0, скважность Q, частота повторения импульсов $f_\text{п}$, длительность импульсов $\tau_\text{и}$ [4].

Расчет требуемого количества каналов, обеспечивающих согласованное обнаружение КРПР, имеющих интервалы априорных неопределенностей: $f_\text{п}$ = 10–20 кГц, f_0 = 4,1–4,4 ГГц, Q = 5–1000, $\tau_\text{и}$ = 0,05–100 нс, – показал, что потребуется $\approx 10^{12}$ каналов. В многоканальных обнаружителях условная вероятность ложной тревоги $F_{\text{л.т}\Sigma}$ определяется условной вероятностью ложной тревоги в одном канале обработки $F_{\text{л.т1}}$ и количеством этих каналов $N_\text{кан}$ и характеризуется выражением [5]

$$F_{\text{л.т}\Sigma} = 1 - (1 - F_{\text{л.т1}})^{N_\text{кан}}.$$

Расчет условной вероятности ложной тревоги для фиксированных значений $F_{\text{л.т1}} = 10^{-6}$, $N_\text{кан} = 10^{12}$ показал, что $F_{\text{л.т}\Sigma}$ возрастет до неприемлемых на практике значений $\approx$ 0,1. Снижение условной вероятности ложной тревоги приводит к повышению порога обнаружения, что в рассматриваемом случае ухудшает характеристики обнаружения.

В целях упрощения реализации обнаружителя и выполнения требований к значениям условной вероятности ложной тревоги, а также снижения вычислительной сложности в средствах пассивной локации вместо согласованной обработки сигналов используются менее чувствительные к сведениям о параметрах разведуемых сигналов квазиоптимальные алгоритмы. На таких алгоритмах реализуются устойчивые к априорной неопределенности как по несущей частоте, виду модуляции, так и по ширине спектра сигнала Δf_s автокорреляционные, взаимокорреляционные и энергетические методы обработки [6], обеспечивающие баланс между точностью и эффективностью. При этом может реализовываться и согласованный ($\Delta f_s = \Delta f_R$ – полоса анализируемых частот), и несогласованный ($\Delta f_R > \Delta f_s$) по полосе частот прием, что позволяет уменьшить число каналов в обнаружителе. Однако упрощение реализации достигается ценой ухудшения качества обнаружения по сравнению с согласованным приемом, поскольку происходит переход к некогерентной обработке сигналов [7].

Центральный элемент современных средств пассивной локации – цифровой параллельный спектроанализатор, каждый спектральный канал которого является энергетическим приемником [8]. Важная особенность применения таких средств – наличие на входе приемного модуля отношения сигнал/шум, составляющего не менее 20 дБ [9].

В случае обнаружения маломощной КРПР для достижения требуемых значений отношения сигнал/шум необходимо накопление сигнала. Однако процесс непрерывного интегрирования входной реализации энергетическим приемником приводит к маскированию полезного сигнала внутриканальными шумами. В результате на входе устройства принятия решения отношение сигнал/шум не достигает требуемых значений [10].

Разработка способа квазиоптимальной обработки КРПР. Увеличение отношения сигнал/шум на входе устройства принятия решения возможно за счет увеличения времени накопления энергии полезного сигнала с принятием соответствующих мер к фильтрации и декорреляции собственного шума приемника [1, 8, 11, 12].

В задачах пассивной локации известен подход повышения отношения сигнал/шум за счет использования различий автокорреляционных функций (АКФ) полезного сигнала и шумов, основывающийся на структуре разведываемого сигнала и диапазоне частот повторения импульсов [12]. При этом в АКФ входной реализации назначаются взвешивающие коэффициенты, выделяющие те области, где воздействие шума на сигнал минимально и, наоборот, исключающие из дальнейшей обработки области АКФ, где полезный сигнал и шум не различимы либо сигнал отсутствует [13]. Однако для реализации этого метода требуется информация об интервале неопределенности частот повторения импульсов, разрешение которого ведет к пропорциональному росту каналов.

Таким образом, для повышения возможностей средств пассивной локации по обнаружению летательных аппаратов требуется разработка способа квазиоптимальной обработки КРПР с низкой энергетической доступностью средств пассивной локации, увеличивающих дальность обнаружения летательных аппаратов по сравнению с энергетическим обнаружителем.

АКФ КРПР (рис. 2) описывается выражением [15]

$$R_{\text{КРПР}}(\tau) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N_{\text{и}}} R_0(\tau - nT_{\text{п}}),$$

где $N_{\text{и}}$ – количество радиоимпульсов в последовательности; $R_0(\tau)$ – корреляционная функция закона модуляции радиоимпульса; n – номер радиоимпульса в последовательности.

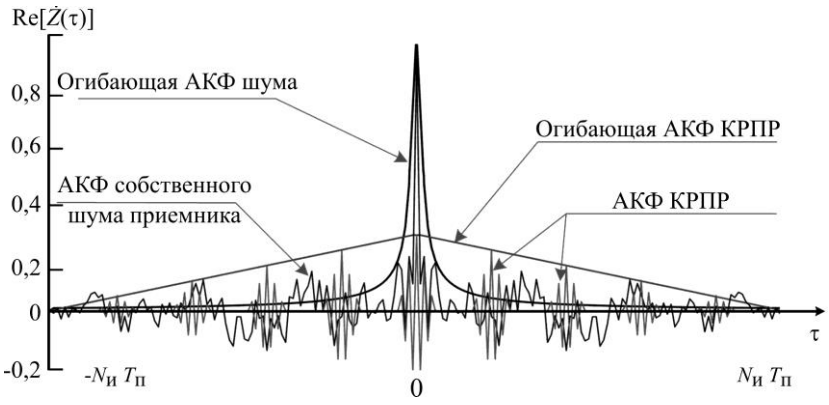


Рис. 2. Нормированные АКФ квазибелого шума и КРПР и их аппроксимированные огибающие

Fig. 2. Normalized ACF of quasi-white noise and quasi-continuous regular sequences of radio pulses and their approximated envelopes

Поскольку априорные сведения о параметрах КРПР неизвестны, то для анализа целесообразно использовать огибающую АКФ КРПР, аппроксимация которой описывается формулой [15]

$$r_N(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{NT_{\text{п}}},$$

где τ – дискретные отсчеты временного рассогласования; $T_{\text{н}} = NT_{\text{п}}$ – время накопления.

АКФ квазибелого шума рассчитывается по формуле [15]

$$R_{\text{ш}}(\tau) = 2\sigma_{\text{ш}}^2 e^{j\omega_0\tau - \frac{|\tau|}{\tau_{\text{к.ш}}}},$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2$ – средняя мощность шума; ω_0 – несущая частота; $\tau_{\text{к.ш}}$ – время корреляции шума.

Как видно из рис. 2, АКФ шума имеет более резкое уменьшение значений амплитуд в областях рассогласования за пределами интервала корреляции, чем полезный сигнал, и по мере увеличения рассогласования вносит меньший вклад в АКФ полезного сигнала, а энергия КРПР линейно убывает к краям АКФ.

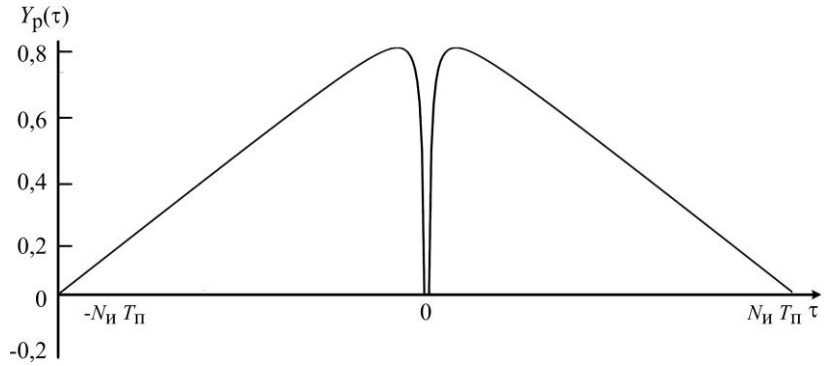


Рис. 3. Нормированная взвешивающая функция
Fig. 3. Normalized weighting function

Таким образом, для подавления шумовой составляющей и выделения полезного сигнала в АКФ реализации целесообразно провести ее взвешивание. Коэффициенты взвешивающей функции (рис. 3) должны быть универсальными для всех значений априорной неопределенности параметров КРПР, нормированными и зависеть от известных параметров: времени накопления реализации $T_{\text{н}}$ и интервала корреляции шума $\tau_{\text{к.ш}} = 1/\Delta f_R$. В этом случае на первом этапе рассчитываются взвешивающие коэффициенты путем перемножения инвертированной огибающей АКФ квазибелого шума, нивелирующей шум, и огибающей АКФ КРПР, выделяющей наиболее энергоемкие области полезного сигнала:

$$Y_{\text{р0}}(\tau) = \left(1 - e^{-\frac{|\tau|}{\tau_{\text{к.ш}}}}\right)\left(1 - \frac{|\tau|}{T_{\text{н}}}\right).$$

Проведем нормирование взвешивающей функции:

$$Y_{\text{р}}(\tau) = Y_{\text{р0}}(\tau) \big/ (Y_{\text{р0 max}}(\tau)).$$

На втором этапе проводится взвешивание комплексной АКФ входной реализации (рис. 4) путем поэлементного перемножения комплексной АКФ входной реализации на взвешивающую функцию:

$$\dot{Z}(\tau) = \dot{R}_{\text{р}}(\tau) Y_{\text{р}}(\tau).$$

После взвешивания центральная часть АКФ КРПР и шума подавлена (рис. 5), а в областях рассогласования отношение сигнал/шум оказывается значительно выше. Однако отсутствие априорной информации о периоде следования КРПР не позволяет принимать решение о наличии либо отсутствии сигнала при реализации по уровню одного из боковых локальных максимумов. Поскольку во взвешенной АКФ гармоническая структура полезного сигнала сохраняется, а значения шума носят случайный характер, то для накопления энергии полезного сигнала целесообразно вычислять АКФ от взвешенной АКФ входной реализации.

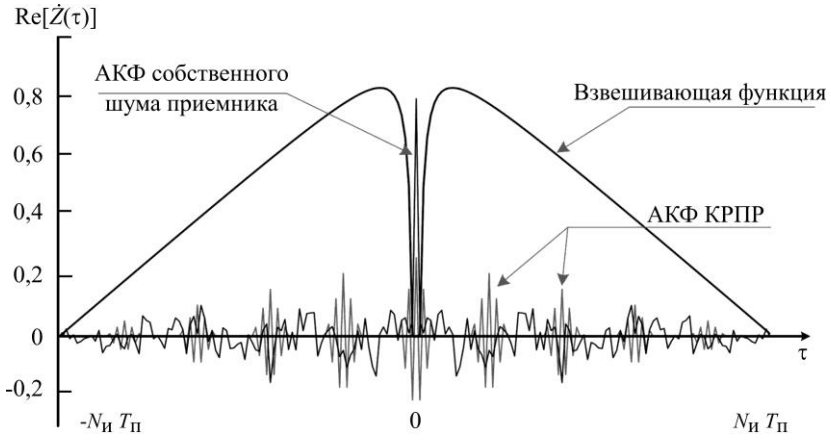


Рис. 4. Процедура взвешивания АКФ входной реализации
Fig. 4. Procedure of weighting the ACF of the input implementation

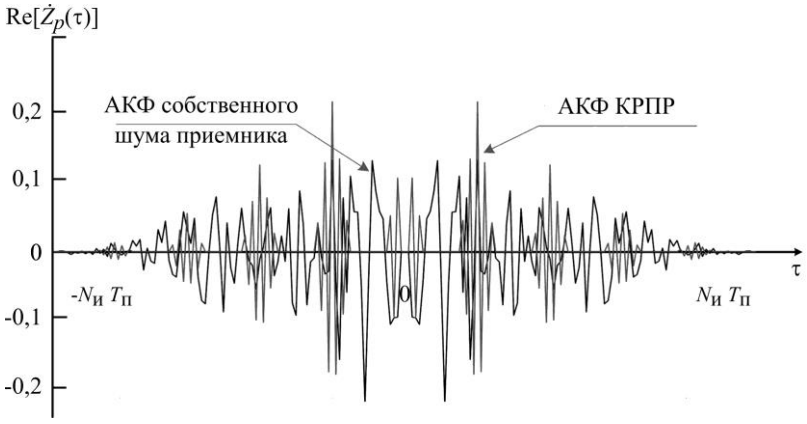


Рис. 5. Реальная часть взвешенной комплексной АКФ входной реализации
Fig. 5. Real part of the weighted complex ACF of the input realization

На третьем этапе вычисляется АКФ от взвешенной АКФ входной реализации и осуществляется проверка гипотезы о наличии полезного сигнала по критерию Неймана – Пирсона.

При оценке эффективности алгоритмов обработки сигналов в средствах пассивной локации важнейшим показателем качества является затрачиваемое на обработку время,

обусловленное количеством элементарных логических операций для реализации алгоритма. В работе [16] установлено, что для вычисления свертки во времени требуется существенно большее количество элементарных логических операций в отличие от получения АКФ путем обратного преобразования Фурье от спектральной плотности мощности входной реализации.

Квазиоптимальная обработка КРПР с низкой энергетической доступностью состоит из следующих операций: вычисление фурье-преобразования аддитивной смеси входной КРПР и внутриканальных шумов; вычисление спектральной плотности мощности входной реализации; вычисление АКФ входной реализации; расчет коэффициентов взвешивающей функции; умножение АКФ входной реализации на взвешивающую функцию; вычисление фурье-преобразования взвешенной АКФ входной реализации; квадратирование модульных значений спектра взвешенной АКФ входной реализации; вычисление АКФ от взвешенной АКФ входной реализации; пороговая обработка.

Моделирование. Оценка эффективности разработанного способа проведена с помощью имитационного моделирования в пакете прикладных программ Matlab [17]. Исходные параметры КРПР при моделировании: диапазон несущих частот $\Delta f_0 = 500$ МГц, перенесенный в область нулевых значений; диапазон частот повторения импульсов $\Delta F_{\text{п}} = [10,\ldots, 20]$ кГц; диапазон длительности импульсов $\Delta\tau_{\text{и}} = [0{,}05,\ldots, 0{,}1]$ нс; количество регистрируемых импульсов $N_{\text{и}} = 5$.

В результате моделирования получены зависимости отношения сигнал/шум на входе устройства принятия решения от отношения сигнал/шум на входе приемного модуля для согласованного, энергетического и разработанного способов обработки (рис. 6), характеризующие коэффициент шума радиоприемного устройства [9]. Как следует из рисунка, выигрыш разработанного способа составляет от 3 до 6 дБ относительно энергетического обнаружителя в диапазоне значений отношения сигнал/шум на входе приемного модуля от 0 до 10 дБ.

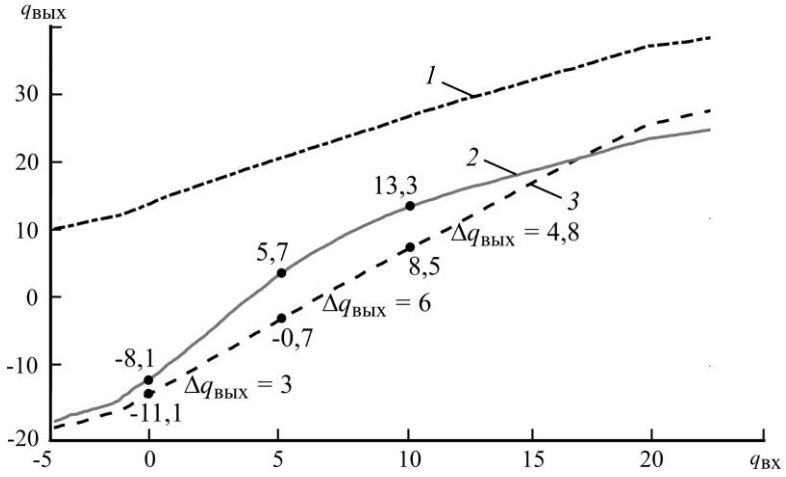


Рис. 6. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе схемы обработки $q_{\text{вых}}$ (для устройства принятия решений – на входе) от отношения сигнал/шум на входе $q_{\text{вх}}$ приемного модуля средства пассивной локации: *1* – согласованный прием; *2* – разработанный способ приема; *3* – энергетический прием

Fig. 6. Dependence of the signal-to-noise ratio at the output of the processing circuit $q_{\text{вых}}$ (for the decision-making device – at the input) on the signal-to-noise ratio at the input $q_{\text{вх}}$ of the receiving module of the passive location device: *1* – coherent reception; *2* – developed technique of reception; *3* – energy reception

Заключение. Разработанный способ квазиоптимальной обработки КРПР позволяет увеличить отношение сигнал/шум на входе устройства принятия решения по сравнению с энергетическим обнаружителем и, как следствие, повысить дальность обнаружения летательных аппаратов – источника излучения маломощных КРПР. При проведении предложенной квазиоптимальной обработки КРПР в отличие от существующих применяется согласованное со временем накопления и шириной полосы анализа взвешивание АКФ входной реализации, исключающее из обработки главный максимум АКФ входной реализации, учитывающее неравномерность воздействия шума на боковые локальные максимумы и выделяющее детерминированную структуру сигнальной составляющей и случайную природу шума. Это ограничивает необходимое количество каналов обработки в приемном устройстве средства пассивной локации, обеспечивающее допустимые значения условной вероятности ложной тревоги.

Описанный способ нечувствителен к априорной информации о диапазонах частот повторения и длительностях импульсов. Количество каналов в данном случае определяется размером фурье-преобразования. При равных начальных условиях способ занимает промежуточное положение между теоретически возможным, но практически не реализуемым согласованным обнаружителем и неэффективным в рассматриваемых условиях.

Последовательное выполнение указанных операций позволяет охарактеризовать рассмотренную обработку сигналов как способ двойного спектрального анализа и взвешенной обработки квазинепрерывных сигналов при отсутствии априорных сведений об их параметрах.

Литература / References

1. Дятлов А. П., Кульбикян Б. Х. *Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга.* М.: Горячая линия – Телеком; 2017. 332 с.
   Dyatlov A. P., Kul'bikyan B. Kh. *Correlation processing of broadband signals in automated radio monitoring complexes.* Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2017. 332 p. (In Russ.).
2. Сосновский А. А. (авт., ред.), Хаймович И. А., Лутин Э. А., Максимов И. Б. *Авиационная радионавигация:* справочник. М.: Транспорт; 1990. 263 с.
   Sosnovskiy A. A. (auth., ed.), Khaymovich I. A., Lutin E. A., Maksimov I. B. *Aviation radio navigation:* reference book. Moscow: Transport Publ.; 1990. 263 p. (In Russ.).
3. Ширман Я. Д. *Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех.* М.: Радио и связь; 1981. 416 с.
   Shirman Y. D. *Theory and technology of radar information processing against the background of interference.* Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1981. 416 p. (In Russ.).
4. Васин В. А., Власов И. Б., Дмитриев Д. Д., Калмыков В. В., Кузнецов А. А., Федоров И. Б. (авт., ред.) и др. *Информационные технологии в радиотехнических системах:* учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана; 2011. 846 с. EDN: ZCKZZH.
   Vasin V. A., Vlasov I. B., Dmitriev D. D., Kalmykov V. V., Kuznetsov A. A., Fedorov I. B. (auth., ed.) et al. *Information technologies in radio engineering systems:* study guide. 3rd ed., rev. and upd. Moscow: Bauman Moscow State Technical Univ. Publ.; 2011. 846 p. (In Russ.).
5. Каргашин В. Л. Проблемы обнаружения и идентификации радиосигналов средств негласного контроля информации. *Специальная техника*. 2000;(4):45–53.
   Kargashin V. L. Problems of detection and identification of radio signals of means of tacit information control. *Spetsial'naya tekhnika*. 2000;(4):45–53. (In Russ.).
6. Дятлов А. П., Дятлов П. А., Понкратов А. И., Приймаков С. Н., Кобзарь В. П., Омельченко А. В. Применение автокорреляционных алгоритмов обработки информации для решения задач радиомониторинга. In: *Вопросы радиоэлектроники:* науч.-техн. сб. Сер. *Общие вопросы радиоэлектроники.* М.: НИИЭИР; 1998, с. 23–31.
   Dyatlov A. P., Dyatlov P. A., Ponkratov A. I., Priymakov S. N., Kobzar V. P., Omelchenko A. V. Application of autocorrelation algorithms of information processing for radio monitoring tasks solution. In: *Voprosy radioelektroniki:* sci.-tech. collection. Ser. *Obshchie voprosy radioelektroniki.* Moscow: NIIEIR Publ.; 1998, pp. 23–31. (In Russ.).

7. Варакин Л. Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами.* М.: Радио и связь; 1985. 236 с.
Varakin L. E. *Spread-spectrum communication systems.* Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1985. 236 p. (In Russ.).
8. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. *Теоретические основы радиоэлектронной разведки.* 2-е изд., испр. и доп. М.: Радиотехника; 2004. 431 с. EDN: RTALSJ.
Radzievsky V. G., Sirota A. A. *Theoretical foundations of radio-electronic reconnaissance.* 2nd ed., rev. and upd. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2004. 431 p. (In Russ.).
9. Рембовский А. М. (авт., ред.), Ашихмин А. В., Козьмин В. А. *Радиомониторинг: задачи, методы, средства.* 4-е изд., испр. М.: Горячая линия – Телеком; 2019. 640 с.
Rembovskiy A. M. (auth., ed.), Ashikhmin A. V., Koz'min V. A. *Radio monitoring: tasks, methods, and tools.* 4th ed., rev. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2019. 640 p. (In Russ.).
10. Баландин И. А., Лаврентьев А. М. Способ накопления маломощных когерентных последовательностей радиоимпульсов в частотной области. *Вестник ВКО*. 2022;(1/2(37)):57–66.
Balandin I. A., Lavrentyev A. M. Method for accumulating low-power coherent radio pulse sequences in the frequency domain. *Vestnik VKO*. 2022;(1/2(37)):57–66.
11. Куприянов А. И., Петренко П. Б., Сычев М. П. *Теоретические основы радиоэлектронной разведки*: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана; 2010. 381 с. EDN: RGRIGP.
Kupriyanov A. I., Petrenko P. B., Sychev M. P. *Theoretical foundations of radio-electronic reconnaissance:* study guide. Moscow: Bauman Moscow State Technical Univ. Publ.; 2010. 381 p. (In Russ.).
12. Баландин И. А., Лаврентьев А. М., Дьяков В. В., Литвинов Н. Н. Способ квазиоптимальной обработки сигналов бортовыми системами когерентно-импульсного типа с низкой энергетической доступностью средствами РТР. *Вестник ЯВВУ ПВО*. 2022;(2):57–66.
Balandin I. A., Lavrentyev A. M., Dyakov V. V., Litvinov N. N. Method of quasi-optimal signal processing by onboard coherent-pulse systems with low energy availability using ELINT systems. *Bulletin of the Yaroslavl Air Defense University*. 2022;(2):57–66.
13. Баландин И. А., Кузнецов К. Е., Лаврентьев А. М., Кириченко А. А. *Способ спектрально-корреляционного обнаружения летательных аппаратов по квазинепрерывным импульсным сигналам бортовых радиоэлектронных систем.* Патент РФ, 2768370, 24.03.2022. 26 с. EDN: IGRUQE.
Balandin I. A., Kuznetsov K. E., Lavrentev A. M., Kirichenko A. A. *Method for spectral-correlation detection of aircraft by quasi-continuous pulse signals of on-board avionic systems.* Patent RF, 2768370, 24.03.2022. 26 p. (In Russ.).
14. Тихонов В. И. *Оптимальный прием сигналов.* М.: Радио и связь; 1983. 320 с.
Tikhonov V. I. *Optimal signal reception.* Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1983. 320 p. (In Russ.).
15. Охрименко А. Е. *Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба*. Ч. 1: *Основы радиолокации*. М.: Воениздат; 1983. 456 с.
Okhrimenko A. E. *Fundamentals of radiolocation and radio electronic warfare.* Pt. 1: *Fundamentals of radiolocation.* Moscow: Voenizdat Publ.; 1983. 456 p. (In Russ.).
16. Алексеев О. В. (авт., ред.), Головков А. А., Пивоваров И. Ю. и др. *Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств:* учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2000. 478 с.
Alekseev O. V. (auth., ed.), Golovkov A. A., Pivovarov I. Yu. et al. *Automation of radio-electronic facilities design:* study guide for universities. Moscow: Vyssh. shk. Publ.; 2000. 478 p. (In Russ.).
17. Баландин И. А., Смолин Р. В., Литвинов Н. Н. *Программа для моделирования процесса формирования решающей статистики при обработке маломощных квазинепрерывных (пачечных) радиосигналов цифровыми радиоприемными устройствами, входящими в состав средств радиомониторинга.* Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ, 2023664827, 10.07.2023. EDN: IFPTPP.
Balandin I. A., Smolin R. V., Litvinov N. N. *Program for simulating the process of formation of decisive statistics in the processing of low-power quasi-continuous (packet) radio signals by digital radio receiving devices included in the radio monitoring means.* Certificate on official registration of the computer program. No. 2023664827, 10.07.2023. (In Russ.).

Информация об авторах

Смолин Роман Владимирович – старший преподаватель кафедры электроники Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр-т, 28), anatory@bk.ru

Баландин Иван Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиотехнических систем Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр-т, 28), brunengj@yandex.ru

Лаврентьев Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, начальник кафедры радиотехнических систем Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр-т, 28), Lawrent@mail.ru

Андрющенков Евгений Евгеньевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиотехнических систем Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр-т, 28), aee78@yandex.ru

Information about the authors

Roman V. Smolin – Senior Lecturer of the Electronics Department, Yaroslavl Higher Military Institute of the Air Defense of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 150001, Yaroslavl, Moskovsky ave., 28), anatory@bk.ru

Ivan A. Balandin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Radio Engineering Systems Department, Yaroslavl Higher Military Institute of the Air Defense of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 150001, Yaroslavl, Moskovsky ave., 28), brunengj@yandex.ru

Alexander M. Lavrentiev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Radio Engineering Systems Department, Yaroslavl Higher Military Institute of the Air Defense of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 150001, Yaroslavl, Moskovsky ave., 28), Lawrent@mail.ru

Evgeny E. Andryushchenkov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Radio Engineering Systems Department, Yaroslavl Higher Military Institute of the Air Defense of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 150001, Yaroslavl, Moskovsky ave., 28), aee78@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 01.10.2024
Поступила после рецензирования / Revised 25.03.2025
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

Научная статья
УДК 004.052.32+681.518.5
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-774-787
EDN: JNZXMI

Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел
III. Эксперименты с тестовыми комбинационными схемами

***Д. В. Ефанов*[1,2,3*], *Е. И. Елина*[1]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*
[3]*Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Узбекистан*

[*] *TrES-4b@yandex.ru*

Аннотация. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел в кольце вычетов по заданному модулю применяются при решении задач технической диагностики. Такие коды эффективны в системах рабочего диагностирования комбинационных схем автоматики и вычислительной техники, при кодировании состояний конечных автоматов в процессе синтеза устройств с памятью. В работе для определения обнаруживающих свойств кодов проведены эксперименты с тестовыми комбинационными схемами с использованием методов дискретной математики, оптимизации булевых функций и технической диагностики дискретных систем. Показано, что взвешенные коды с последовательностью весовых коэффициентов из натурального ряда чисел с модулем $M = 8$ менее эффективно обнаруживают ошибки на выходах тестовых схем, чем аналогичные классические модульные коды. Установлено, что при бóльших значениях M достигается существенное улучшение обнаруживающих характеристик. Проведено сравнение кодов с последовательностью весовых коэффициентов из натурального ряда чисел, за исключением степеней двойки. Установлено, что рассматриваемые коды при $M = 8, 16, 32$ для одних схем эффективны, для других – нет. При $M = 64$ получены как аналогичные характеристики обнаружения ошибок, так и худшие характеристики относительно работы кодов с последовательностью весовых коэффициентов из натурального ряда чисел, за исключением степеней двойки. Выявленные закономерности и свойства рассматриваемого класса кодов могут использоваться на практике при синтезе высоконадежных дискретных устройств и систем.

Ключевые слова: системы технического диагностирования дискретных устройств, модульные взвешенные коды с суммированием, последовательность весовых коэффициентов, натуральный ряд

Для цитирования: Ефанов Д. В., Елина Е. И. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел. III. Эксперименты с тестовыми комбинационными схемами. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):774–787. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-774-787. EDN: JNZXMI.

© Д. В. Ефанов, Е. И. Елина, 2025

Original article

Sum codes of the weight coefficients of digits from a natural series of numbers

III. Experiments with combinational benchmarks

***D. V. Efanov*[1,2,3*], *Y. I. Yelina*[1]**

[1]*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*
[2]*Russian University of Transport, Moscow, Russia*
[3]*Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan*

[*] *TrES-4b@yandex.ru*

Abstract. The weight-based sum codes of digits from a natural series of numbers in a ring of deductions according to a given module are used when solving technical diagnostic problems. Such codes are effective in systems of operational diagnostics of combinational benchmarks of automation and computer technology, in encoding the states of finite automata in the design of devices with memory. In this work, to determine the detecting properties of the developed codes the experiments with combinational benchmarks were conducted using methods of discrete mathematics, Boolean functions optimization, and technical diagnostics of discrete systems. It was demonstrated that the weight-based codes with a sequence of weighting coefficients from a natural series with a modulus $M = 8$ are less effective in detecting errors at the outputs of test circuits than similar classical modular codes. It was found that at higher values of M, a significant improvement in the detection characteristics is achieved. The comparison has been made with codes with a sequence of weighting coefficients from a natural series, with the exception of powers of two. It has been established that the codes under consideration at $M = 8, 16, 32$ are more effective for a number of benchmarks and less effective for the others. At $M = 64$, similar error detection characteristics as well as worse characteristics in regards to the work of codes with a sequence of weighting coefficients from a natural series, with the exception of powers of two, were obtained. The revealed patterns and properties of the considered class of codes can be effectively used in practice in the design of highly reliable discrete devices and systems.

Keywords: systems of technical diagnostics of discrete devices, modular weight-based sum codes, sequence of weight coefficients, natural series

For citation: Efanov D. V., Yelina Y. I. Sum codes of the weight coefficients of digits from a natural series of numbers. III. Experiments with combinational benchmarks. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):774–787. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-774-787.

Введение. Взвешенные коды с суммированием в кольце вычетов по заданному модулю, используемые при синтезе дискретных устройств и систем, – не изученный до конца класс блоковых кодов с малой избыточностью. В работе [1] рассмотрена процедура взвешивания натуральными числами разрядов информационного вектора при построении кода для повышения обнаруживающих характеристик для конкретного устройства. В [2] исследованы взвешенные коды, при построении которых значения ве-

совых коэффициентов подбираются с учетом свойств схемы (конкретных логических элементов и конфигураций связей между ними, входами и выходами схемы). В [3] описаны коды, при построении которых взвешиваются разряды или пары разрядов числами из натурального ряда (последовательность A000027 [4]), отмечены некоторые общие свойства кодов с малым числом информационных разрядов и строятся кодеры для данных кодов. В [5] развиты методы построения взвешенных кодов с суммированием и получен результат использования всех возможных способов взвешивания для построения кодов, избыточность которых равна избыточности классических кодов Бергера. В [6] рассмотрены коды, у которых взвешивается неединичным коэффициентом всего один разряд, а затем используется модуль кода Бергера при подсчете суммарного значения веса. Это дает возможность построения семейства взвешенных кодов с суммированием с особыми свойствами обнаружения отдельных видов ошибок в информационных векторах. В [7] обобщены некоторые способы построения взвешенных кодов с суммированием и их свойства. В [8, 9] исследованы закономерности и свойства, присущие классу взвешенных кодов с суммированием в кольце вычетов по заданному модулю, являющемуся степенью двойки, при построении которых использована последовательность A000027, а также описан подход к синтезу тестеров данных кодов. Модульные коды с суммированием весовых коэффициентов обозначены как *WS*(*m, k, M*)-коды с отдельным указанием выбранной последовательности A весовых коэффициентов при их построении.

В настоящей работе приводятся результаты, полученные в ходе экспериментов с тестовыми комбинационными схемами: оценивались обнаруживающие характеристики *WS*(*m, k, M*)-кодов при организации контроля вычислений на выходах тестовых комбинационных схем. Характеристики рассматриваемого класса кодов сравниваются с широко известными классическими модульными кодами с суммированием [2, 10, 11] и с *WS*(*m, k, M*)-кодами, при построении которых использована последовательность чисел, образующих натуральный ряд, за исключением степеней двойки (последовательность A057716) [12]. Данная последовательность применяется в работе [13] для построения кода, эффективного для передачи данных в асимметричных каналах связи и для решения задач технической диагностики дискретных систем.

Обнаружение ошибок модульными взвешенными кодами с суммированием на выходах тестовых комбинационных схем. В эксперименте с тестовыми комбинационными схемами, представленными в формате *.netblif из набора LGSynth’89 [14] (в данном формате описана структура тестовой схемы), оценивали эффективность применения *WS*(*m, k, M*)-кодов с последовательностью A000027 для обнаружения ошибок на выходах схем. При этом учитывали характеристики обнаружения ошибок в информационных векторах рассматриваемыми кодами.

Методика эксперимента следующая. Вначале моделируется работа схемы при условии отсутствия неисправностей. Затем в схему последовательно вносятся одиночные константные неисправности (stuck-at faults) на выходы внутренних логических элементов, на входы схемы подается полное множество наборов значений аргументов и фиксируются ошибки, вызываемые неисправностями на ее выходах. Ошибки классифицируются на обнаруживаемые и необнаруживаемые. Необнаруживаемые ошибки, в свою очередь, – по видам и кратностям. Это позволяет собрать статистические данные об эффективности использования *WS*(*m, k, M*)-кодов для обнаружения ошибок на выходах тестовых схем.

В табл. 1 и 2 приведены результаты экспериментов для десяти тестовых схем. В табл. 1 содержатся данные по абсолютным показателям обнаружения ошибок на выходах тестовых схем, в частности N_m – общее количество необнаруженных ошибок,

Таблица 1

Абсолютные показатели обнаружения ошибок *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодами на выходах тестовых комбинационных схем

Table 1

Absolute error detection rates of *WS*(*m*, *k*, *M*) codes at the outputs of combinational benchmarks

Тестовая схема	Число выходов	Код	N_m	Всего по видам			Распределение общего количества ошибок по кратностям				
				N_v	N_σ	N_α	N_1	N_2	N_3	N_4	$N_{\geq 5}$
cm162a	5	*WS*(5, 3, 8)	6277	6277	0	0	0	5829	448	0	0
		WS(5, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Общее количество ошибок на выходах			317331	314067	1920	1344	248348	37886	23996	6877	224
cm163a	5	*WS*(5, 3, 8)	20288	20288	0	0	0	20288	0	0	0
		WS(5, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Общее количество ошибок на выходах			1221312	1203648	10368	7296	987648	132096	79680	21824	64
alu2	6	*WS*(6, 3, 8)	805	681	28	96	0	380	364	61	0
		WS(6, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	71	0	8	63	0	0	63	8	0
Общее количество ошибок на выходах			62838	52460	7722	2656	46424	12347	3707	316	44
x2	7	*WS*(7, 3, 8)	518	518	0	0	0	174	344	0	0
		WS(7, 4, 16)	344	344	0	0	0	0	344	0	0
		WS(7, *k*, *M*), *M*=32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Общее количество ошибок на выходах			19708	19484	104	120	16624	2428	544	96	16
alu4	8	*WS*(8, 3, 8)	322564	261962	402	60200	256781	2946	21311	29270	12256
		WS(8, 4, 16)	30732	1022	227	29483	0	0	1820	28871	41
		WS(8, *k*, *M*), *M*=32, 64	1025	0	227	798	0	0	798	227	0
Общее количество ошибок на выходах			1980377	1652112	187276	140989	1435142	303511	152600	68918	20206
f51m	8	*WS*(8, 3, 8)	2492	2474	16	2	2380	94	2	16	0
		WS(8, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	22	0	22	0	0	6	0	16	0

Окончание

Тестовая схема	Число выходов	Код	N_m	Всего по видам			Распределение общего количества ошибок по кратностям				
				N_v	N_σ	N_α	N_1	N_2	N_3	N_4	$N_{\geq 5}$
Общее количество ошибок на выходах			13264	13055	123	86	12285	857	92	30	0
pcle	9	*WS*(9, 3, 8)	2211479	2174103	25600	11776	2006499	47426	45773	53921	57860
		WS(9, 4, 16)	84119	80535	0	3584	0	0	32695	25405	26019
		WS(9, 5, 32)	17840	17840	0	0	0	0	0	0	17840
		WS(9, 6, 64)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Общее количество ошибок на выходах			17472087	17144919	188416	138752	15696664	493980	448104	390486	442853
cu	11	*WS*(11, 3, 8)	28256	26720	0	1536	4352	22368	1536	0	0
		WS(11, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	1536	0	0	1536	0	0	1536	0	0
Общее количество ошибок на выходах			137984	101120	34048	2816	73760	60800	2336	1088	0
pm1	13	*WS*(13, 3, 8)	94960	89344	3472	2144	89344	1792	2144	1680	0
		WS(13, 4, 16)	2032	0	1680	352	0	0	352	1680	0
		WS(13, *k*, *M*), *M*=32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Общее количество ошибок на выходах			757760	710144	27392	20224	698112	37632	15872	6144	0
sct	15	*WS*(15, 3, 8)	383624	272136	15320	96168	262144	10156	29092	37588	44644
		WS(15, 4, 16)	61508	6240	6444	48824	0	4932	24988	8052	23536
		WS(15, 5, 32)	18760	536	2828	15396	0	0	1800	5108	11852
		WS(15, 6, 64)	10728	64	2828	7836	0	0	1800	3884	5044
Общее количество ошибок на выходах			16586128	15823744	240096	522288	15588776	246280	210272	156076	384724

Таблица 2

Относительные показатели обнаружения ошибок *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодами на выходах тестовых комбинационных схем

Table 2

Relative error detection rates of *WS*(*m*, *k*, *M*) codes at the outputs of combinational benchmarks

Тестовая схема	Число выходов	Код	$\gamma_{m,k}$, %	Доля ошибок по видам от общего числа			Доля ошибок по кратностям от общего числа				
				$\upsilon_{m,k}$, %	$\sigma_{m,k}$, %	$\alpha_{m,k}$, %	$\zeta_{m,k,1}$, %	$\zeta_{m,k,2}$, %	$\zeta_{m,k,3}$, %	$\zeta_{m,k,4}$, %	$\zeta_{m,k,\geq 5}$, %
cm162a	5	*WS*(5, 3, 8)	1,978	1,978	0	0	0	1,837	0,141	0	0
		WS(5, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
cm163a	5	*WS*(5, 3, 8)	1,661	1,661	0	0	0	1,661	0	0	0
		WS(5, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
alu2	6	*WS*(6, 3, 8)	1,281	1,084	0,045	0,153	0	0,605	0,579	0,097	0
		WS(6, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	0,113	0	0,013	0,1	0	0	0,1	0,013	0
x2	7	*WS*(7, 3, 8)	2,628	2,628	0	0	0	0,883	1,745	0	0
		WS(7, 4, 16)	1,745	1,745	0	0	0	0	1,745	0	0
		WS(7, *k*, *M*), *M*=32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
alu4	8	*WS*(8, 3, 8)	16,288	13,228	0,02	3,04	12,966	0,149	1,076	1,478	0,619
		WS(8, 4, 16)	1,552	0,052	0,011	1,489	0	0	0,092	1,458	0,002
		WS(8, *k*, *M*), *M*=32, 64	0,052	0	0,011	0,04	0	0	0,04	0,011	0
f51m	8	*WS*(8, 3, 8)	18,788	18,652	0,121	0,015	17,943	0,709	0,015	0,121	0
		WS(8, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	0,166	0	0,166	0	0	0,045	0	0,121	0
pcle	9	*WS*(9, 3, 8)	12,657	12,443	0,147	0,067	11,484	0,271	0,262	0,309	0,331
		WS(9, 4, 16)	0,481	0,461	0	0,021	0	0	0,187	0,145	0,149
		WS(9, 5, 32)	0,102	0,102	0	0	0	0	0	0	0,102
		WS(9, 6, 64)	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Окончание

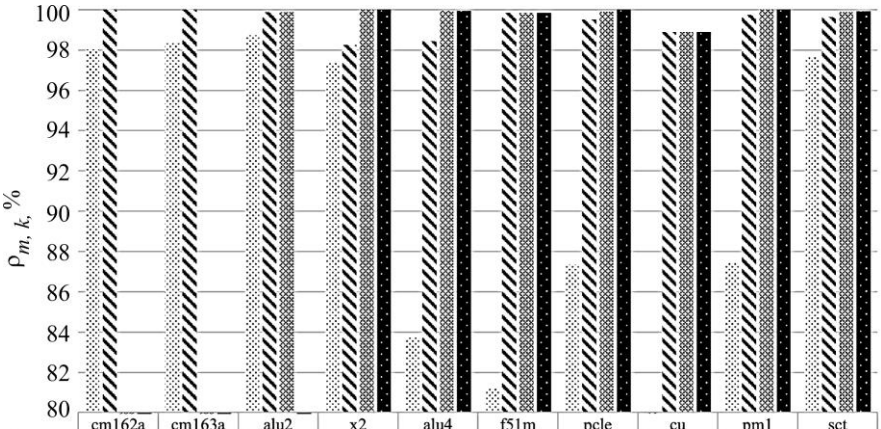
Тестовая схема	Число выходов	Код	$\gamma_{m,\,k}$, %	Доля ошибок по видам от общего числа			Доля ошибок по кратностям от общего числа				
				$\upsilon_{m,\,k}$, %	$\sigma_{m,\,k}$, %	$\alpha_{m,\,k}$, %	$\zeta_{m,\,k,\,1}$, %	$\zeta_{m,\,k,\,2}$, %	$\zeta_{m,\,k,\,3}$, %	$\zeta_{m,\,k,\,4}$, %	$\zeta_{m,\,k,\,\geq 5}$, %
cu	11	*WS*(11, 3, 8)	20,478	19,365	0	1,113	3,154	16,211	1,113	0	0
		WS(11, *k*, *M*), *M*=16, 32, 64	1,113	0	0	1,113	0	0	1,113	0	0
pm1	13	*WS*(13, 3, 8)	12,532	11,791	0,458	0,283	11,791	0,236	0,283	0,222	0
		WS(13, 4, 16)	0,268	0	0,222	0,046	0	0	0,046	0,222	0
		WS(13, *k*, *M*), *M*=32, 64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sct	15	*WS*(15, 3, 8)	2,313	1,641	0,092	0,58	1,581	0,061	0,175	0,227	0,269
		WS(15, 4, 16)	0,371	0,038	0,039	0,294	0	0,03	0,151	0,049	0,142
		WS(15, 5, 32)	0,113	0,003	0,017	0,093	0	0	0,011	0,031	0,071
		WS(15, 6, 64)	0,065	0	0,017	0,047	0	0	0,011	0,023	0,03

N_υ, N_σ, N_α – общее количество необнаруженных монотонных, симметричных и асимметричных ошибок [8], N_d – количество необнаруженных ошибок с кратностями d. Классификация ошибок с разными видами по кратностям не приведена ввиду ее громоздкости. В табл. 2 включены рассчитанные относительные показатели обнаружения ошибок на выходах тестовых схем (их удобнее анализировать, чем абсолютные). Столбец $\gamma_{m,\,k}$ содержит данные о доле необнаруженных ошибок от общего их количества. Столбцы $\upsilon_{m,\,k}$, $\sigma_{m,\,k}$ и $\alpha_{m,\,k}$ дают представление о долях необнаруженных монотонных, симметричных и асимметричных ошибок от общего числа возникающих на выходах схем ошибок. В столбцах $\zeta_{m,\,k,\,d}$ приведены доли необнаруживаемых ошибок с кратностями d от общего числа возникающих на выходах схем ошибок.

Анализируя данные табл. 1 и 2, можно сделать выводы о том, какие виды и кратности ошибок не обнаруживаются *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодами. Существенное влияние оказывают ошибки малых кратностей, а также монотонные и асимметричные ошибки. Отметим, что для некоторых схем коды с модулями M=16, 32, 64 или коды с модулями M = 32, 64 имеют одинаковые свойства обнаружения ошибок.

Наихудшие свойства, как и ожидалось, имеют *WS*(*m*, 3, 8)-коды. Они не обнаруживают большого количества монотонных ошибок, а при числе выходов тестовых схем более семи не обнаруживают некоторое количество одиночных ошибок. Применение кодов с модулями M = 16, 32, 64 оказывается эффективнее.

На рис. 1 представлены диаграммы, характеризующие долю обнаруженных ошибок на выходах тестовых схем, %: $\rho_{m,\,k} = 100 - \gamma_{m,\,k}$. Анализ диаграммы свидетельствует о том, что для схем с числом выходов более семи *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027 не обнаруживают существенной доли ошибок. Это вызвано тем, что для данных схем в классе необнаруживаемых оказываются одиночные ошибки. Для схем с числом выходов менее восьми применение *WS*(*m*, 3, 8)-кодов наиболее эффективно: идентифицировано свыше 97 % ошибок. Для кодов с бóльшими значениями модулей значения показателя $\rho_{m,\,k}$ во всех случаях превышают 98 %, а для ряда схем составляют более 99,7 % и даже достигают 100 %. Для многих схем нет разницы в применении *WS*(*m*, 5, 32)- и *WS*(*m*, 6, 64)-кодов (пять схем из десяти рассмотренных). Таким образом, применение помехозащищенных *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодов с последовательностью A000027 позволяет получить хорошие результаты обнаружения ошибок на выходах тестовых схем.



	cm162a	cm163a	alu2	x2	alu4	f51m	pcle	cu	pm1	sct
M=8	98,022	98,339	98,719	97,372	83,712	81,212	87,343	79,522	87,468	97,687
M=16	100	100	99,887	98,255	98,448	99,834	99,519	98,887	99,732	99,629
M=32	0	0	99,887	100	99,948	99,834	99,898	98,887	100	99,887
M=64	0	0	0	100	99,948	99,834	100	98,887	100	99,935

Рис. 1. Значения показателей $\rho_{m,\,k}$, %
Fig. 1. Values of indicators $\rho_{m,\,k}$, %

Сравнение характеристик обнаружения ошибок *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодами с разными последовательностями весовых коэффициентов. Для определения эффективности кодов с последовательностью весовых коэффициентов A000027 по сравнению с аналогичными кодами с последовательностями A000012 (это последовательность единиц из энциклопедии Слоуна, используемая при построении классических модульных кодов с суммированием) и A057716 рассмотрим отдельно коды с последовательностями A000027 и A000012, A000027 и A057716. Для этого введем еще один показатель, позволяющий сравнивать разницу в числе обнаруженных кодами ошибок.

Проведем сравнение по обнаруживающим характеристикам на выходах тестовых комбинационных схем кодов с последовательностями A000027 и A000012. Для этого вычислим показатель $\delta_{m,k}$, %, характеризующий разницу между количеством обнаруженных ошибок на выходах тестовых схем с применением *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодов с последовательностью A000027 и количеством обнаруженных ошибок с помощью кодов с последовательностью A000012 (рис. 2).

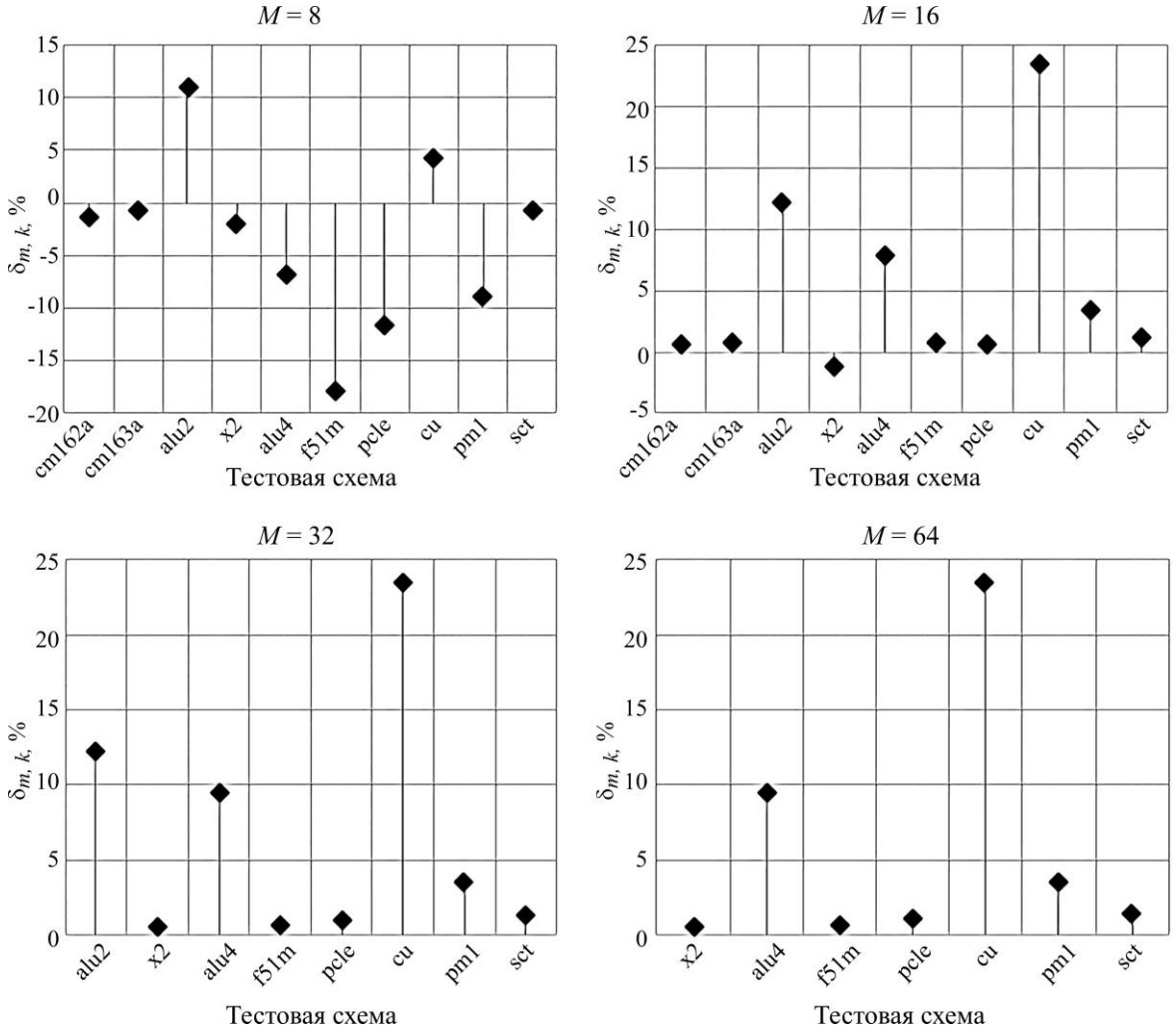


Рис. 2. Значения показателей $\delta_{m,k}$, %
Fig. 2. Values of indicators $\delta_{m,k}$, %

Из анализа данных рис. 2 следует, что *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027 хуже справляются с ошибками на выходах тестовых схем, чем *WS*(*m*, 4, 16)-коды с последовательностью A000012. Для некоторых схем значение показателя $\delta_{m,k}$

меньше –10 %. Для двух тестовых схем *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027 эффективнее. Лучше обнаруживают ошибки на выходах схем *WS*(*m*, 4, 16)-коды с последовательностью A000027 по сравнению с *WS*(*m*, 4, 16)-кодами с последовательностью A000012. Только для одной схемы показатель $\delta_{m,\,k}$ оказался меньше нуля. *WS*(*m*, 5, 32)- и *WS*(*m*, 6, 64)-коды с последовательностью A000027 по сравнению с аналогичными кодами с последовательностью A000012 намного лучше обнаруживают ошибки на выходах тестовых схем.

Проведем сравнение по обнаруживающим характеристикам на выходах тестовых комбинационных схем кодов с последовательностями A000027 и A057716. Для этого вычислим показатель $\varepsilon_{m,\,k}$, %, характеризующий разницу между количеством обнаруженных ошибок на выходах тестовых схем с применением *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодов с последовательностью A000027 и количеством обнаруженных ошибок с помощью кодов с последовательностью A057716 (рис. 3). В данном случае в отличие от кодов с последовательностью A000012 для сравнения используется другая характеристика обнаружения ошибок.

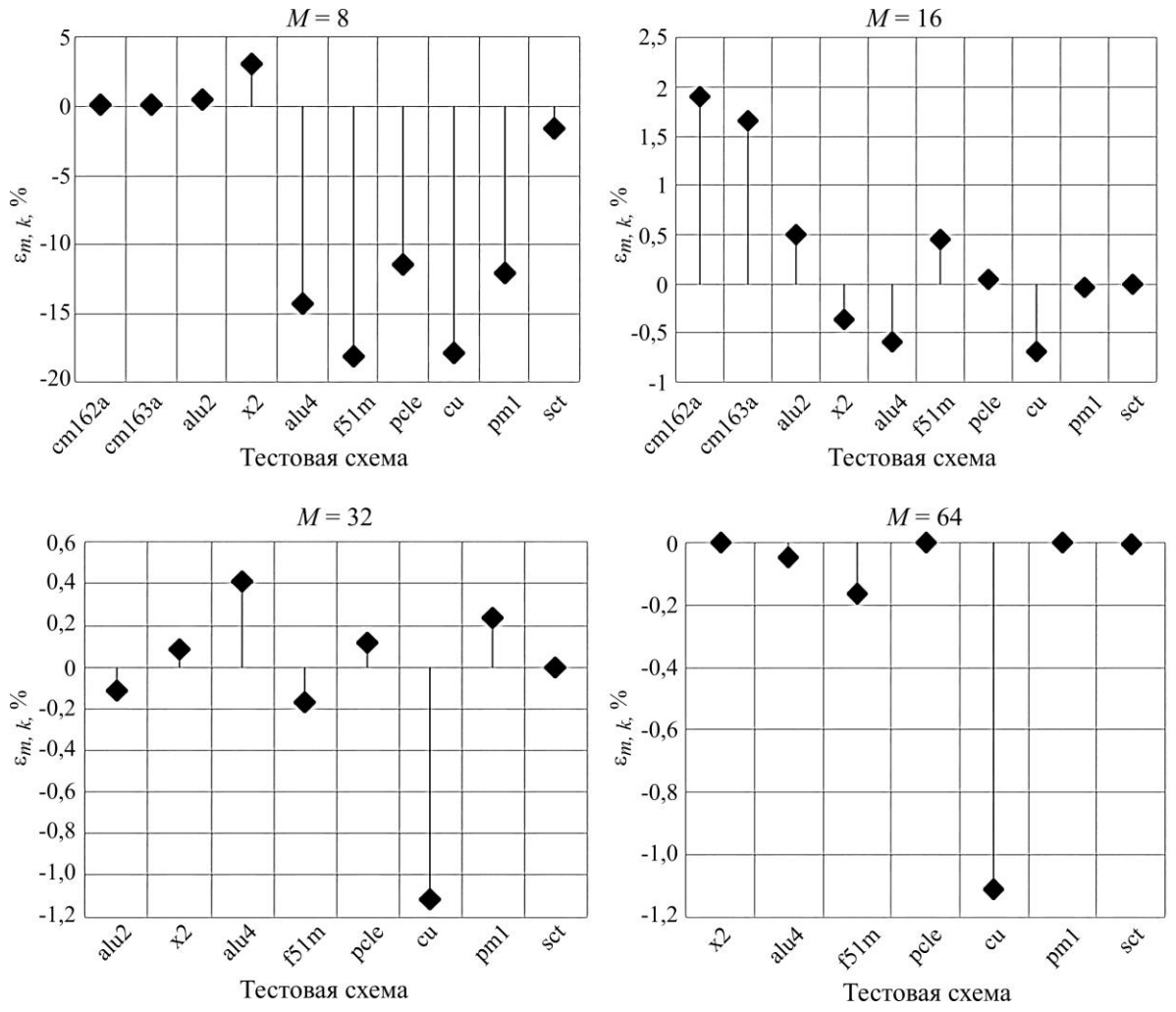


Рис. 3. Значения показателей $\varepsilon_{m,\,k}$, %
Fig. 3. Values of indicators $\varepsilon_{m,\,k}$, %

WS(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027 обнаруживают чуть большее количество ошибок, чем аналогичные коды с последовательностью A057716 на выходах тестовых схем с числом выходов менее восьми. Для остальных тестовых схем больше ошибок обнаруживают коды с последовательностью A057716. Отметим, что для пяти из десяти приведенных схем разница превышает $\varepsilon_{m,k} = -10$ %. На порядок меньше разброс значений показателя $\varepsilon_{m,k}$ наблюдается при рассмотрении *WS*(*m*, 4, 16)-кодов ($\varepsilon_{m,k}$ находится в диапазоне +2...–1 %).

Для пяти тестовых схем наиболее эффективным оказывается *WS*(*m*, 4, 16)-код с последовательностью A000027. При использовании *WS*(*m*, 5, 32)-кодов характер показателя $\varepsilon_{m,k}$ аналогичен характеру данного показателя при использовании *WS*(*m*, 4, 16)-кодов с тестовыми схемами: для четырех схем из восьми наиболее эффективен *WS*(*m*, 5, 32)-код с последовательностью A000027. Выигрыш в данном случае несущественный – в пределах 0,5 %. Для одной схемы использование *WS*(*m*, 5, 32)-кода с последовательностью A057716 дало выигрыш более чем –1 % по сравнению с использованием кода с последовательностью A000027. Результаты применения *WS*(*m*, 6, 64)-кодов для обнаружения ошибок на выходах тестовых схем следующие: преимущество у кодов с последовательностью A057716; использование данной последовательности при построении кода позволило обнаружить большее количество ошибок на выходах трех из семи тестовых схем; для четырех схем количество обнаруженных ошибок двумя типами кодов совпало.

Эксперименты показали, что в каждом конкретном случае требуется проводить моделирование неисправностей из заданной модели и оценивать эффективность применения *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодов с той или иной последовательностью. Однако можно сделать некоторые общие выводы. Например, классические модульные коды со значением $M = 8$ в большинстве случаев эффективнее обнаруживают ошибки на выходах схем, чем *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027. Это объясняется тем, что классические модульные коды лучше справляются с монотонными и асимметричными ошибками, чем *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027. Для бóльших значений модулей эффективнее применение *WS*(*m*, *k*, *M*)-кодов с последовательностью A000027. *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027 лучше обнаруживают ошибки на выходах схем с числом выходов менее восьми, чем аналогичные коды с последовательностью A057716. Это можно объяснить тем, что *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A000027 с $m < 8$ являются помехозащищенными, а с $m \geq 8$ теряют это свойство (см. столбцы N_1 табл. 1 или $\zeta_{m,k,1}$ табл. 2). Поэтому помехозащищенные *WS*(*m*, 3, 8)-коды с последовательностью A057716 эффективнее для схем с числом выходов более восьми. *WS*(*m*, *k*, *M*)-коды с последовательностью A000027 при бóльших значениях модулей лучше справляются с ошибками на выходах схем. Однако следует учитывать ограничения $m < M$ и применять только помехозащищенные коды. При больших значениях модуля коды с последовательностью A057716 не имеют преимуществ перед кодами с последовательностью A000027.

Заключение. Эксперименты с тестовыми комбинационными схемами MCNC Benchmarks показали, что *WS*(*m*, 3, 8)-коды для большинства схем хуже обнаруживают ошибки, чем классические модульные коды с суммированием единичных разрядов (коды с последовательностью A000012). Однако *WS*(*m*, 4, 16)-, *WS*(*m*, 5, 32)- и *WS*(*m*, 6, 64)-коды имеют весомое преимущество. При их применении число обнаруживаемых ошибок достигает 15–20 % по сравнению с классическими модульными кодами с суммированием. Можно отметить, что для некоторых схем применение *WS*(*m*, 3, 8)-, *WS*(*m*, 4, 16)- и *WS*(*m*, 5, 32)-кодов с последовательностью A000027 оказывается эффек-

тивнее по сравнению с кодами с последовательностью A057716, а для некоторых лучшие результаты показывают коды с последовательностью A057716. *WS*(*m*, 6, 64)-коды с последовательностью A057716 оказываются либо такие же по характеристикам обнаружения ошибок на выходах тестовых схем, либо лучше, чем коды с последовательностью A000027. В связи с этим простой выбор последовательности без изменения принципов построения *WS*(*m*, *k*, *M*)-кода позволяет существенно изменить характеристики обнаружения ошибок на выходах тестовых схем.

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на анализе характеристик кодов с суммированием не весовых коэффициентов разрядов, а весовых коэффициентов групп разрядов, например пар разрядов. Такие коды описаны в [15] и недетально изучены в [3, 16]. Коды с установлением весовых коэффициентов для групп разрядов с последовательностью весовых коэффициентов A000027 с разными значениями модулей $M \in \left\{2^2, 2^3, ..., 2^{\lceil \log_2(W_{\max}+1)\rceil-1}, 2^{\lceil \log_2(W_{\max}+1)\rceil}\right\}$ к настоящему времени исследованы неполностью. Хорошо изучены только коды такого типа при взвешивании пар подряд следующих разрядов (y_i, y_{i+1}), $i = \overline{1, m-1}$, со значениями модулей M = 4 и 8 [6, 17].

Таким образом, *WS*(*m*, *k*, *M*)-коды с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд, могут эффективно применяться при построении высоконадежных дискретных устройств и систем.

Литература / References

1. Das D., Touba N. A. Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits. In: *Proceedings 17th IEEE VLSI Test Symposium (Cat. No. PR00146).* Dana Point, CA: IEEE; 1999, pp. 370–376. https://doi.org/10.1109/VTEST.1999.766691
2. Das D., Touba N. A., Seuring M., Gossel M. Low cost concurrent error detection based on module weight-based codes. In: *Proceedings 6th IEEE International On-Line Testing Workshop (Cat. No. PR00646).* Palma de Mallorca: IEEE; 2000, pp. 171–176. https://doi.org/10.1109/OLT.2000.856633
3. Мехов В. Б., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием. *Автомат. и телемех.* 2008;(8):153–165. EDN: NBKMJT.
   Mekhov V. B., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Checking of combinational circuits basing on modification sum codes. *Autom. Remote Control.* 2008;69(8):1411–1422. https://doi.org/10.1134/S0005117908080134
4. *On-Line Encyclopedia of Integer Sequences.* Available at: https://oeis.org/ (accessed: 08.09.2025).
5. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Using codes with summation of weighted bits to organize checking of combinational logical devices. *Autom. Control Comput. Sci.* 2019;53(1):1–11. https://doi.org/10.3103/S0146411619010061
6. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Коды с суммированием с фиксированными значениями кратностей обнаруживаемых монотонных и асимметричных ошибок для систем технического диагностирования. *Автомат. и телемех.* 2019;(6):121–141. https://doi.org/10.1134/S0005231019060072. EDN: XKWTTH.
   Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Sum codes with fixed values of multiplicities for detectable unidirectional and asymmetrical errors for technical diagnostics of discrete systems. *Autom. Remote Control.* 2019;80(6):1082–1097. https://doi.org/10.1134/S0005117919060079
7. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. *Коды с суммированием для систем технического диагностирования:* в 2 т. Т. 2: *Взвешенные коды с суммированием.* М.: Наука; 2021. 455 с. EDN: KIHERR.
   Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. *Sum codes for technical diagnostics systems:* in 2 vol. Vol. 2: *Weight-based sum codes.* Moscow: Nauka Publ.; 2021. 455 p. (In Russ.).
8. Ефанов Д. В., Елина Е. И. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел. I. Свойства кодов с суммированием. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(3):344–361. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-3-344-361. EDN: FCOVRA.
   Efanov D. V., Yelina Y. I. Sum codes of weight coefficients of digits from a natural series of numbers. I. Properties of sum codes. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2025;30(3):344–361. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-3-344-361

9. Ефанов Д. В., Елина Е. И. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел. II. Синтез тестеров кодов с суммированием. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(4): 497–507. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-4-497-507. EDN: EZHVOK.
Efanov D. V., Yelina Y. I. Sum codes of weight coefficients of digits from a natural series of numbers. II. Synthesis of sum code checkers. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(4):497–507. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-4-497-507
10. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем. *Автомат. и телемех.* 2015;(10):152–169. EDN: UXGNQV.
Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Applications of modular summation codes to concurrent error detection systems for combinational Boolean circuits. *Autom. Remote Control.* 2015;76(10):1834–1848. https://doi.org/10.1134/S0005117915100112
11. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Modular sum code in building testable discrete systems. In: *2015 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).* Batumi: IEEE; 2015, pp. 181–187. https://doi.org/10.1109/EWDTS.2015.7493133
12. Ефанов Д. В., Елина Е. И. Модульные коды с суммированием с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел за исключением степеней двойки. *Автоматика на транспорте.* 2024;10(3):296–330. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-03-296-330. EDN: AFQVKW.
Efanov D. V., Elina E. I. Modular sum codes with a sequence of weight coefficients forming a natural number series excluding powers of two. *Avtomatika na transporte = Transport Automation Research.* 2024;(3):296–300. (In Russ.). https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-03-296-330
13. Berger J. M. A note on error detection codes for asymmetric channels. *Information and Control.* 1961;4(1):68–73. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(61)80037-5
14. *Collection of Digital Design Benchmarks.* Available at: https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/ (accessed: 08.09.2025).
15. Saposhnikov V., Saposhnikov Vl. New code for fault detection in logic circuits. In: *Proc. 4 Int. Conf. Unconvent. Electromech. Electr. Syst., St. Petersburg, Russia, June 2–24, 1999.* St. Petersburg: Baltic State Technical University; 1999, pp. 693–696.
16. Дмитриев В. В. О двух способах взвешивания и их влиянии на свойства кодов с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля логических схем. *Известия Петербургского университета путей сообщения.* 2015;(3):119–129. EDN: UNRRHF.
Dmitriyev V. V. On the two weighing methods and their influence on properties of sum codes of weighted transitions in functional logical scheme control systems. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya = Proceedings of Petersburg Transport University.* 2015;(3):119–129. (In Russ.).
17. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Котенко А. Г. Модульные коды с суммированием взвешенных переходов с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел. *Труды СПИИРАН.* 2017;(1):137–164. https://doi.org/10.15622/SP.50.6. EDN: XVLOVT.
Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Kotenko A. Modulo codes with summation of weighted transitions with natural number sequence of weights. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings.* 2017;(1):137–164. (In Russ.). https://doi.org/10.15622/sp.50.6

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 Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9); профессор кафедры автоматики и телемеханики Ташкентского государственного транспортного университета (Узбекистан, 100167, г. Ташкент, 1-й пр-д Темирйулчилар, 1), TrES-4b@yandex.ru

Елина Есения Игоревна – аспирант Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29), eseniya-elina@mail.ru

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, Politekhnicheskaya st., 29); Prof. of the Automation, Remote Control and Communications on Railway Transport Department, Institute of Transport Technology and Control Systems, Russian University of Transport (Russia, 127994, Moscow, Obraztsov st., 9, bld. 9); Prof. of the Automation and Telemechanics Department, Tashkent State Transport University (Uzbekistan, 100167, Tashkent, 1st Dr Temiryulchilar, 1), TrES-4b@yandex.ru

Yeseniya I. Yelina – PhD student 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, Politekhnicheskaya st., 29), eseniya-elina@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 22.11.2024
Поступила после рецензирования / Revised 25.11.2024
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

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

С тематическими указателями статей за 1997 – 2025 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

Научная статья
УДК 004.4'412
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-788-794
EDN: KAPWQE

Особенности учета неопределенностей при машинной обработке естественных языков

М. В. Слюсарь, Р. Ссали*

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

* *ssalironnie07@gmail.com*

Аннотация. При обработке естественного языка проблема неопределенностей – критическая задача для автоматизации на основе искусственного интеллекта в цифровой экономике. В работе раскрыты лексические, семантические, референциальные, прагматические неопределенности, возникающие в естественном языке. Предложен алгоритм, повышающий уровень надежности за счет разрешения контекстной неоднозначности и уменьшения количества неверных интерпретаций. Эмпирические результаты показали повышение точности классификации и лучшую адаптивность в неоднозначных сценариях. Предложенный подход может применяться в приложениях цифровой экономики, таких как чат-боты для обслуживания клиентов, анализ настроений для прогнозирования рынка и научных исследований. Показано, что при смягчении неопределенности алгоритм усиливает предиктивный контроль в автоматизированных системах на основе искусственного интеллекта.

Ключевые слова: управление неопределенностью, естественный язык, предиктивное управление, искусственный интеллект, лексико-смысловая неоднозначность, контекстная неоднозначность, цифровая экономика

Для цитирования: Слюсарь М. В., Ссали Р. Особенности учета неопределенностей при машинной обработке естественных языков. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):788–794. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-788-794. EDN: KAPWQE.

© М. В. Слюсарь, Р. Ссали, 2025

Original article

Features of accounting for uncertainties in machine processing of natural languages

M. V. Sliusar, R. Ssali*

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *ssalironnie07@gmail.com*

Abstract. The problem of uncertainties in natural language processing is a critical challenge for AI-driven automation in the digital economy. In this work, lexical, semantic, referential, pragmatic uncertainties that occur in natural language processing are identified. An algorithm enhancing the reliability level due to context disambiguation and misinterpretations reduce is proposed. The empirical results have shown an improvement in classification accuracy and better adaptability in ambiguous scenarios. The proposed approach can be used in digital economy applications, such as customer service chat bots, sentiment analysis for market forecasting, and scientific research. It was demonstrated that by mitigating uncertainty, the algorithm strengthens AI-driven predictive control in automated systems.

Keywords: uncertainty management, natural language, predictive control, AI, lexical and semantic ambiguity, context ambiguity, digital economy

For citation: Sliusar M. V., Ssali R. Features of accounting for uncertainties in machine processing of natural languages. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):788–794. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-788-794.

Введение. При обработке естественного языка возникают разные типы неопределенностей, которые ставят под сомнение надежность автоматизации на основе искусственного интеллекта (ИИ) в условиях цифровой экономики. Управление неопределенностями имеет решающее значение для улучшения предиктивного управления в автоматизированных процессах, поскольку неправильная интерпретация может дестабилизировать производительность системы и повлиять на точность и доверие пользователей [1].

В настоящей работе рассматриваются существующие подходы к обработке неопределенностей и их ограничения, предлагается новый алгоритм для повышения точности и надежности обработки естественного языка (Natural Language Processing, NLP) с помощью ИИ за счет минимизации неоднозначностей языка.

Подходы к управлению неопределенностями в ИИ-ориентированном NLP. Типы неопределенностей в NLP:

– лексическая двусмысленность: слова с несколькими значениями, такие как «банк», зависят от контекста для точной интерпретации;

– семантическая двусмысленность: слова с одним значением, которое меняется в зависимости от контекста, например «свет» (освещенность и вес);

– референциальная неопределенность: трудность в определении ссылок на сущность, как, например, при выделении «он» во фразе «Джон и Мэри»;

– прагматическая двусмысленность: изменчивость предполагаемого значения в зависимости от тона, например «все в порядке» [2, 3].

Существуют разные подходы к решению проблемы неопределенностей NLP, каждый из которых способствует созданию надежных систем ИИ, хотя и с определенными ограничениями.

Статистические модели. Скрытые марковские модели (HMMs) и условные случайные поля (CRFs) используют вероятностные прогнозы для контекстной деамбигуации. Однако они требуют больших вычислительных затрат и могут упускать особенности языка.

Системы, основанные на правилах. Эти системы опираются на предопределенные лингвистические правила для решения конкретных неоднозначных ситуаций, например:

– разрешение местоимения: такие правила, как «он», относятся к последнему субъекту мужского пола, уточняют обращения в “Valentin argued with Ronald. He left”. К кому относится «он»? Valentin or Ronald?

– грамматическая дезамбигуация: созданные вручную правила отмечают конфликтующие структуры. Например: “Time flies like an arrow”, т. е. время движется быстро (сравнение времени с летящей стрелой). Time = подлежащее, flies = глагол; “Fruit flies like a banana”, т. е. фруктовые мухи (насекомые) любят бананы. Fruit flies = подлежащее (словосочетание с существительным), like = глагол;

– чат-боты, ориентированные на конкретный домен: первые боты для обслуживания клиентов (например, в системах бронирования авиабилетов) используют правила, чтобы сопоставить фразу “I want to change my flight” с заранее определенным рабочим процессом.

Системы, основанные на правилах, эффективны для решения узких задач, они с трудом справляются с изменчивостью языка (например, сленгом, сарказмом) и плохо масштабируются на открытые контексты [1].

Подходы машинного обучения. Методы глубокого обучения, включая рекуррентные нейронные сети и трансформеры, позволяют улавливать сложные языковые паттерны и адаптироваться к контексту, но нередко требуют большого количества помеченных данных и вычислительных ресурсов [4, 5].

Вероятностные модели. Байесовские сети и марковские процессы принятия решений предлагают вероятностные рассуждения, но могут оказаться недостаточно масштабируемыми для решения масштабных задач NLP [6].

Разработка алгоритма для решения проблемы неопределенностей в NLP. Перечислим основные ограничения и проблемы существующих методов:

– зависимость от данных: методы машинного обучения опираются на большие наборы данных с метками, получение которых может быть дорогостоящим и отнимать много времени [7];

– контекстуальная сложность: многие методы с трудом справляются с интерпретацией тонких изменений контекста, что сказывается на точности при решении задач обнаружения сарказма [8];

– масштабируемость: высокие вычислительные требования, особенно для глубокого обучения, сужают применимость в условиях ограниченных ресурсов [9].

Предлагаемый алгоритм устраняет перечисленные ограничения, уравновешивая теоретическую строгость и практическую адаптивность, что повышает надежность приложений NLP.

В качестве примера разрешения лексических и семантических неоднозначностей рассмотрим английское предложение “The bank can guarantee deposits will be secure”. Слово “bank” неоднозначно и может относиться как к финансовому учреждению, так и к берегу реки. Для того чтобы разрешить эту лексическую неоднозначность, алгоритм использует следующие шаги [10]:

Шаг 1. Токенизация и извлечение контекста:

жетоны: $\{w_1,,,,,w_n\}$;

определитель: $\{d_1,,,,,d_n\}$;

контекст (c): {“The”, “can”, “guarantee”, “deposits”, “will”, “be”, “secure”} .

Шаг 2. Разграничение смыслов:

– возможный смысл: $(s)=\{f,r\}$;

– вычислить вероятность: $p(s/c)$. Алгоритм вычисляет вероятность каждого смысла с учетом наблюдаемого контекста, используя

$$p(s/c)=\frac{p(c/s)\cdot p(s)}{p(c)},$$

где $p(s/c)$ – вероятность того, что контексту будет придан определенный смысл; $p(s)$ – предварительная вероятность каждого смысла; $p(c)$ – вероятность наблюдаемого контекста.

Шаг 3. Выбор смысла: алгоритм выбирает смысл с наибольшей вероятностью $\text{sense}=\arg\text{Max}_s\, p(s/c)$.

Данный подход позволяет алгоритму использовать контекст для точного разрешения лексической неоднозначности слова “bank”, выбирая смысл с наибольшей контекстуальной релевантностью.

В качестве примера разрешения синтаксических двусмысленностей рассмотрим предложение: “The bank can guarantee deposits will be secure”. Алгоритм, разрешающий эту синтаксическую неоднозначность, будет учитывать контекст, построение дерева разбора, синтаксический анализ и правила предпочтения. Проанализируем два дерева разбора:

Дерево 1: (The (bank(can(guarantee(deposits will) be) secure))).

Дерево 2: ((The bank)(can(guarantee deposits)(will be secure))).

Затем применим правила предпочтения для выбора дерева разбора. Введем оценку предпочтений *ps* для каждого дерева разбора, основанную на синтаксических правилах и контексте:

$$ps(T)=R_wC_s.$$

Алгоритм выбирает дерево разбора с наивысшим баллом предпочтения:

$$p_t=\arg\text{Max}_T\, ps(T).$$

Таким образом, рассматривая интеграцию нейронных сетей и символьных рассуждений для обработки неопределенности в NLP,

$$F_p=(\alpha p_s)+(1-\alpha)\,p_n,$$

где F_p – комбинированное предсказание; α – весовой вектор, отражающий степень доверия к символическим рассуждениям $(0 \le \alpha \le 1)$; p_s – символическое предсказание; p_n – нейросетевое предсказание.

Полученные результаты эксперимента основаны на использовании моделей ByteNet + LSTM и ByteNet + ResNet, т. е. на сравнении предсказаний двух моделей (таблица).

Оценка точности экспериментальных моделей
Accuracy assessment of experimental models

Модель	Число итераций	Испытание, %	Обучение, %	Общая оценка, %
ByteNet + LSTM	25	98,3	96,8	95,2
ByteNet + ResNet	50	66,1	61,2	58,6

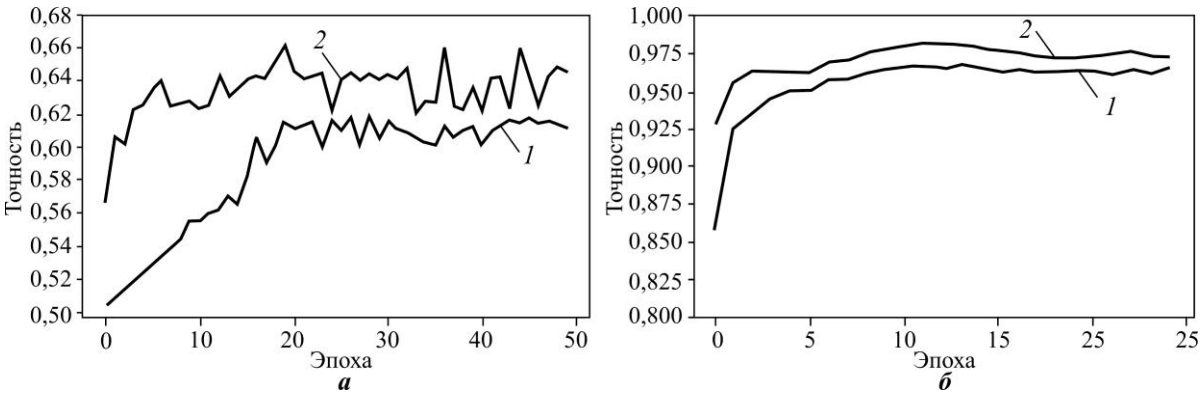
Точность рассчитывается по формуле

$$Acc = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)},$$

где TP – истинно положительные результаты; TN – истинно отрицательные результаты; FP – ложноположительные результаты; FN – ложноотрицательные результаты.

Приведенная формула измеряет долю правильно предсказанных экземпляров (как положительных, так и отрицательных) от общего числа экземпляров в наборе данных.

На рисунках показано, как меняется точность в процессе обучения и тестирования при использовании моделей ByteNet + ResNet и ByteNet + LSTM. Видно, насколько хорошо работает каждая модель и как улучшается или изменяется их точность с течением времени в процессе обучения и тестирования.



Визуализация точности моделей ByteNet + ResNet (*а*) и ByteNet + LSTM (*б*): *1* – точность обучения; *2* – тестовая точность
Visualization of the accuracy of the ByteNet + ResNet (*a*) and ByteNet + LSTM (*b*) models: *1* – training accuracy; *2* – testing accuracy

Заключение. Предложенный алгоритм для решения проблемы неопределенностей в NLP улучшает контекстуальную деамбигуацию и вероятностные рассуждения. В результате эмпирической оценки модель ByteNet + LSTM на 30 % улучшила точность классификации по сравнению с базовой моделью ByteNet + ResNet с улучшенной про-

изводительностью при решении лексических, семантических и прагматических неоднозначностей. С качественной точки зрения алгоритм повышает интерпретируемость и устойчивость в практических задачах NLP, таких как анализ настроений и чат-боты, имеющих ключевое значение для приложений цифровой экономики – прогнозирования рыночных тенденций и автоматизации обслуживания клиентов. Это подтверждает способность гибридных архитектур противостоять неопределенностям, достигая при этом баланс между вычислительной эффективностью и масштабируемостью.

Литература / References

1. Поляков Д. В., Елисеев А. И., Андреев Д. С., Селиванов А. Ю. Подход к машинному обучению моделей открытых систем на основе теории нечетких множеств. In: *Цифровизация агропромышленного комплекса:* сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф. (Тамбов, 21–23 окт. 2020). Т. 2. Тамбов: Тамбовский гос. техн. ун-т; 2020, с. 347–352. EDN: LSCBWD.
   Polyakov D. V., Eliseev A. I., Andreyev D. S., Selivanov A. Yu. A new approach to machine learning for fuzzy models of open systems. In: *Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa:* collected papers of 2nd International res.-to-pract. conf. (Tambov, 21–23 okt. 2020). Vol. 2. Tambov: Tambov State Tech. Univ.; 2020, pp. 347–352. (In Russ.).
2. Григорьев Д. В. Применение машинного обучения и естественного языкового процессинга в анализе текстовых данных: обзор методов, эффективности и перспектив. In: *Научные исследования молодых ученых:* сб. статей XXVIII Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 27 июня 2024). Пенза: Наука и просвещение; 2024, с. 9–11. EDN: BDNYWX.
   Grigoriev D. V. Application of machine learning and natural language processing in text data analysis: Overview of methods, effectiveness and prospects. In: *Nauchnye issledovaniya molodykh uchenykh:* collected papers of 28th International res.-to-pract. conf. (Penza, 27 iyunya 2024). Penza: Nauka i prosveshchenie Publ.; 2024, pp. 9–11. (In Russ.).
3. Воробьева А. А., Федосенко М. Ю. Методы интеллектуального анализа данных и обработки естественного языка в управлении роботизированными производственными системами. *Доклады ТУСУР.* 2023;26(3):65–71. https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-3-65-71. EDN: UJGUUB.
   Vorobeva A. A., Fedosenko M. Yu. Methods for data mining and natural language processing in the management of robotic production systems. *Doklady TUSUR = Proceedings of the TUSUR University.* 2023;26(3):65–71. (In Russ.). https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-3-65-71
4. Бритов В. С., Мартышкин А. И., Данилов Е. А. Обзор и сопоставление в задачах обработки естественного языка сверхточных и рекуррентных нейронных сетей. *Тенденции развития науки и образования.* 2023;(97-12):41–45. https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-654. EDN: JBPZQT.
   Britov V. S., Martyshkin A. I., Danilov E. A. Review and comparison in natural language processing tasks of convolutional and recurrent neural networks. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya.* 2023;(97-12):41–45. (In Russ.). https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-654
5. Лобач В. И., Зайцева А. В., Лобач С. В. О байесовском подходе в машинном обучении на основе MCMC-метода. *Экономика, моделирование, прогнозирование.* 2021;(15):192–198. EDN: IGWWRP.
   Lobach V., Zaytseva A., Lobach S. On bayesian approach in machine learning based on MCMC-method. *Ekonomika, modelirovanie, prognozirovanie.* 2021;(15):192–198. (In Russ.).
6. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D. et al. Going deeper with convolutions. In: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* Boston, MA: IEEE; 2015, pp. 1–9. https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594
7. Гудков А. А. Прогнозирование эффективности проектной деятельности на основе интеграции подходов бизнес-аналитики и машинного обучения. *Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева.* 2024;2(1):27–36. https://doi.org/10.51965/2076-7919_2024_2_1_27. EDN: QYXZHC.
   Gudkov A. A. Forecasting the efficiency of project activities based on the integration of business analytics and machine learning approaches. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva = Reporter of Volzhsky University after V. N. Tatischev.* 2024;2(1):27–36. (In Russ.). https://doi.org/10.51965/2076-7919_2024_2_1_27
8. Brownlee J. Encoder-decoder recurrent neural network models for neural machine translation. *Machine Learning Mastery.* 07.08.2019. Available at: https://machinelearningmastery.com/encoder-decoder-recurrent-neural-network-models-neural-machine-translation/ (accessed: 10.09.2025).

9. Алейник А. О. Применение нейронных сетей для обработки естественного языка в информационных технологиях. *Студенческий.* 2023;(26-1):17–18. EDN: TKEYHQ.
Aleynik A. O. Neural networks application for natural language processing in information technologies. *Studencheskiy.* 2023;(26-1):17–18. (In Russ.).
10. Капелько И. В., Шиман Д. В. Трехуровневая токенизация для автоматического реферирования текста. In: *Информационные технологии:* материалы 83-й науч.-техн. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием) (Минск, 04–15 февр. 2019). Минск: БГТУ; 2019, с. 53. EDN: YZVFNZ.
Kapel'ko I. V., Shiman D. V. Three-level tokenization for automated text summarization. In: *Informatsionnye tekhnologii:* proceedings of 83th sci.-tech. conf. for academic teaching staff, scientific researchers and postgraduate students (with international participation) (Minsk, 04–15 fevr. 2019). Minsk: BelSTU; 2019, p. 53. (In Russ.).

Информация об авторах

Слюсарь Мария Владимировна – аспирант, ассистент Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mar_vin@bk.ru

Ссали Рональд – аспирант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ssalironnie07@gmail.com

Information about the authors

Maria V. Sliusar – PhD student, Assistant of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), mar_vin@bk.ru

Ronald Ssali – PhD student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ssalironnie07@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 24.02.2025
Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2025
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

Научная статья
УДК 004.89.032.26:621.3.049.77
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-795-805
EDN: KBMPFC

Применение и перспективы методов искусственного интеллекта в прогнозировании и оптимизации целостности сигнала в микросистемах

Шань Гуанбао[1], Ли Голян[1], Ван Юйсюань[1], Ци Пэйхан[1], В. И. Гончаренко[2], А. С. Волков[3], С. С. Муратчаев[2*]

[1]Сианьский университет электронных наук и технологий, г. Сиань, Китай
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия
[3]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

[*] *said.muratchaev@gmail.com*

Аннотация. Целостность сигнала (Signal Integrity, SI) в микросистемах существенно влияет на их производительность. Создание точных и высокоскоростных моделей прогнозирования целостности сигнала в микросистемах и проведение их интеллектуальной оптимизации – актуальная задача. В настоящее время нейронные сети и эвристические алгоритмы оптимизации широко применяются для прогнозирования и оптимизации SI-показателей микросистем. В работе систематически обобщены методы прогнозирования SI-показателей с использованием нейронных сетей, включая искусственные, глубокие, рекуррентные, сверточные, а также нейронные сети, использующие априорные знания. Рассмотрены интеллектуальные алгоритмы оптимизации для целостности сигнала, такие как генетический алгоритм, дифференциальная эволюция, оптимизация роя частиц, глубокая разбиенческая древовидная байесовская оптимизация и двухэтапная байесовская оптимизация. Проведен сравнительный анализ характеристик и областей применения современных методов, спрогнозированы перспективы их развития.

Ключевые слова: микросистемы, целостность сигнала, нейронные сети, алгоритмы оптимизации

Для цитирования: Шань Гуанбао, Ли Голян, Ван Юйсюань, Ци Пэйхан, Гончаренко В. И., Волков А. С., Муратчаев С. С. Применение и перспективы методов искусственного интеллекта в прогнозировании и оптимизации целостности сигнала в микросистемах. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):795–805. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-795-805. EDN: KBMPFC.

© Шань Гуанбао, Ли Голян, Ван Юйсюань, Ци Пэйхан, В. И. Гончаренко, А. С. Волков, С. С. Муратчаев, 2025

Original article

Application and prospects of artificial intelligence methods in predicting and optimizing signal integrity in microsystems

***Shan Guangbao*[1], *Li Guoliang*[1], *Wang Yuxuan*[1], *Qi Peihan*[1], *V. I. Goncharenko*[2], *A. S. Volkov*[3], *S. S. Muratchaev*[2*]**

[1]*Xidian University of Electronic Science and Technology, Xi'an, China*
[2]*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*
[3]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

[*] *said.muratchaev@gmail.com*

Abstract. The signal integrity (SI) in microsystems has a significant impact on their performance. It is critical to build accurate and high-speed SI prediction models in microsystems and intelligently optimize them. Recently, neural networks (NN) and heuristic optimization algorithms have been widely applied to predict and optimize the SI performance of microsystems. In this work, the SI prediction methods using neural networks, including Artificial Neural Network (ANN), Deep Neural Network (DNN), Recurrent Neural Network (RNN), Convolution Neural Network (CNN), and neural networks using prior knowledge, are systematically summarized. Intelligent optimization algorithms for SI, such as Genetic Algorithm (GA), Differential Evolution (DE), Particle Swarm Optimization (PSO), Deep Partition Tree Bayesian Optimization (DPT-BO), and Two-Stage Bayesian Optimization (TSBO), are considered. The comparative analysis of the characteristics and application areas of modern methods has been carried out and their development prospects have been predicted.

Keywords: microsystems, signal integrity, neural networks, optimization algorithms

For citation: Shan Guangbao, Li Guoliang, Wang Yuxuan, Qi Peihan, Goncharenko V. I., Volkov A. S., Muratchaev S. S. Application and prospects of artificial intelligence methods in predicting and optimizing signal integrity in microsystems. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2025;30(6):795–805. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-795-805.

Введение. С развитием технологий 5G, Интернета вещей и искусственного интеллекта растет спрос на интеллектуальные и электронные системы, ориентированные на высокую производительность и миниатюризацию. Такие системы широко применяются в высокопроизводительных вычислениях, интеллектуальной медицине, автономном вождении, носимых устройствах и других областях [1–5]. Однако по мере того как размеры компонентов уменьшаются до атомных пределов, применение закона Мура для повышения производительности чипов становится менее эффективным [6–8]. Технологии микросистем на основе передового уровня упаковки являются новейшим эффективным способом стимулирования развития электронных систем в отношении высокой производительности и миниатюризации [9–11].

В работе [12] предложена микросистема для высокопроизводительных вычислений на основе технологий трехмерной интеграции, объединяющая CPU, GPU и DRAM для достижения высокого уровня пропускной способности и эффективных вычислений. В [13] с использованием технологий передового уровня упаковки описан процесс интегрирования вычислительных ядер с высокоскоростной памятью в высокопроизводительные микросистемы памяти, что позволило снизить энергопотребление на 25 % по сравнению с NVIDIA Volta. В [14] рассмотрена разработанная высокопроизводительная микросистема на основе разных технологических процессов, оснащенная 96-ядерным процессором с задержкой сигнала менее 0,6 нс/мм. В [15] представлена спроектированная микросистема для приема и передачи радиочастотных сигналов, основанная на технологиях трехмерной интеграции и включающая в себя направленный ответвитель, приемопередатчик и маршрутизатор с решеткой на основе массива волноводов. При этом производительность вычислений увеличилась на 23 %, а энергопотребление снизилось на 30 %. В [16] предложена микросистема, объединяющая память, вычислительные модули и сенсоры для высокопроизводительной обработки информации. В [17] описаны технологии передового уровня упаковки для гетерогенной интеграции одного 14-нм FPGA-чипа и двух 22-нм DSP-чипов, в результате чего реализовано межчиповое соединение с применением интерфейса Advanced Interface Bus. Это обеспечило скорость передачи данных 4 Гбит/с на контакт, энергоэффективность 0,10–0,46 пДж/бит и плотность пропускной способности 1,705 Тбит/с/мм², что значительно повысило производительность электронных систем.

В последние годы искусственный интеллект активно развивается и применяется в таких областях, как прогнозирование производительности [18], совместная оптимизация [19], распознавание изображений [20], обнаружение дефектов [21], процессы микроизготовления [22], что перспективно в области проектирования целостности сигнала (Signal Integrity, SI) в микросистемах. Применение методов искусственного интеллекта при проектировании микросистем включает в себя четыре этапа [23]: определение решаемой задачи, установление параметров проектирования и характеристик производительности; сбор данных; использование полученных данных для обучения нейронной сети, построение модели нейронной сети и реализация прогнозирования производительности; применение модели нейронной сети для интеллектуальных алгоритмов оптимизации с целью улучшения SI-микросистем. Прогнозирование и оптимизация производительности – два ключевых аспекта применения методов искусственного интеллекта при проектировании SI-микросистем. Однако на сегодняшний день отсутствует систематическое обобщение алгоритмов и их сценариев применения.

Цель настоящей работы – систематическое обобщение методов прогнозирования SI-показателей для повышения производительности SI-микросистем с использованием искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Network, ANN), глубоких нейронных сетей (Deep Neural Network, DNN), рекуррентных нейронных сетей (Recurrent Neural Network, RNN), сверточных нейронных сетей (Convolution Neural Network, CNN), а также нейронных сетей, использующих априорные знания. Рассматриваются такие интеллектуальные алгоритмы оптимизации для SI, как генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA), дифференциальная эволюция (Differential Evolution, DE), оптимизация роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO), глубокая разбиенческая древовидная байесовская оптимизация (Deep Partition Tree Bayesian Optimization, DPT-BO) и двухэтапная байесовская оптимизация (Two-Stage Bayesian Optimization, TSBO).

Нейронные сети в прогнозировании производительности SI-микросистем. Нейронные сети представляют собой структуру, аналогичную работе человеческого мозга, которая способна обучаться отображению взаимосвязей между входными и выходными данными (рис. 1) [24]. Как правило, нейронная сеть состоит из входного слоя, скрытых слоев и выходного слоя. При проектировании SI-микросистем входной слой содержит параметры проектирования структур соединений и микроволновых устройств; скрытые слои – множество нейронов, используемых для изучения взаимосвязей между входным и выходным слоями; выходной слой – параметры производительности, связанные с целостностью сигнала в микросистемах, такие как временная или частотная характеристики. В зависимости от сложности задачи исследователи могут регулировать способность нейронной сети к обучению путем изменения количества скрытых слоев: чем больше скрытых слоев, тем выше способность нейронной сети к изучению сложных взаимосвязей. Нейронные сети широко применяются в таких областях, как прогнозирование диаграмм глаза для структур соединений микросистем [20], анализ перекрестных помех [25], частотный анализ [26], извлечение паразитных параметров [27] и др.

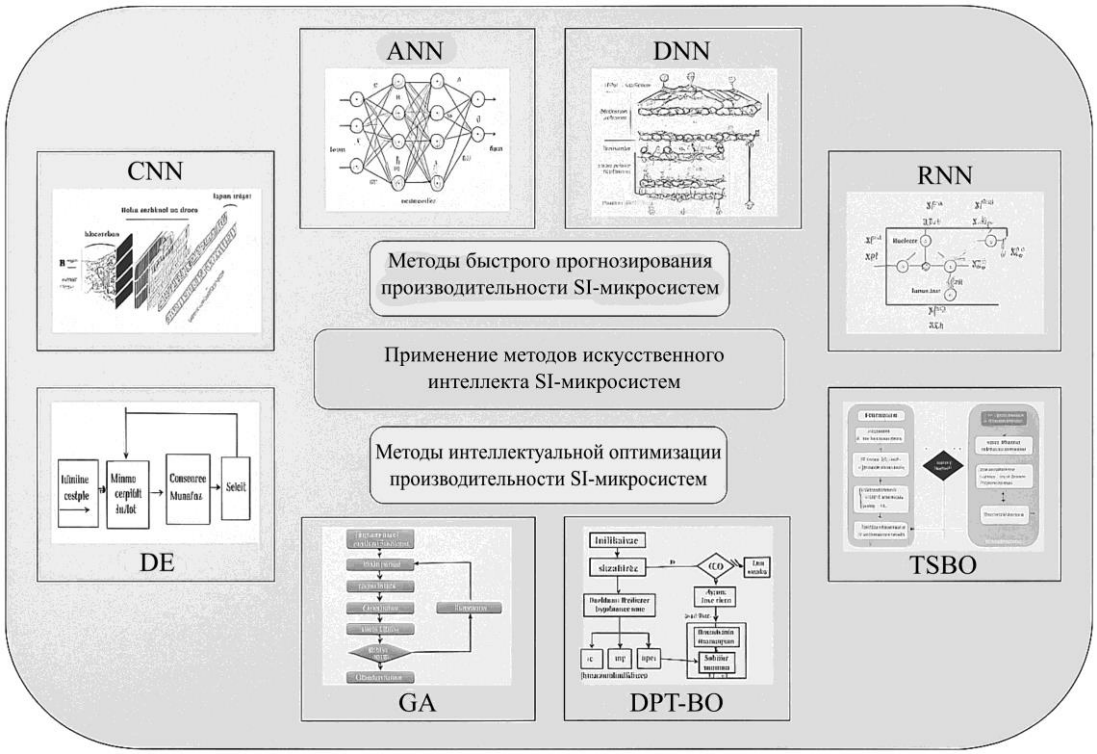


Рис. 1. Схематическое изображение применения методов искусственного интеллекта в SI-микросистемах

Fig. 1. Schematic representation of the application of artificial intelligence methods in SI microsystems

Процесс построения модели прогнозирования SI-микросистем с использованием нейронных сетей показан на рис. 2. В первую очередь необходимо определить задачу проектирования SI-микросистем; далее, исходя из задачи проектирования установить параметры проектирования, производительности и диапазон параметров проектирования; с использованием методов планирования эксперимента создаются комбинации данных параметров проектирования, которые используются для построения электро-

магнитной модели симуляции в HFSS/CST/ADS; на основе электромагнитной симуляции формируется набор данных, состоящий из параметров проектирования и соответствующих параметров производительности; на основе характеристик данных параметров проектирования и производительности определяется тип нейронной сети и ее гиперпараметры; в завершение модель нейронной сети обучается на этом наборе данных, что позволяет создать высокоскоростную модель прогнозирования SI-микросистем на основе нейронной сети.



Рис. 2. Блок-схема процесса построения модели прогнозирования целостности сигнала в микросистемах с использованием нейронной сети

Fig. 2. Flowchart of the process of constructing a model for predicting SI in microsystems using a neural network

Методы, основанные на нейронных сетях, получили широкое применение в прогнозировании целостности сигнала в микросистемах. ANN имеет простую структуру и подходит для задач с относительно простой зависимостью между входными и выходными данными. DNN благодаря большему числу скрытых слоев может использоваться для прогнозирования более сложных взаимосвязей между входными и выходными SI-параметрами, однако для ее обучения требуется больший объем данных. ANN и DNN сосредоточены на минимизации ошибок скалярных данных и не учитывают физические характеристики прогнозирования целостности сигнала в микросистемах. RNN и CNN, напротив, могут улавливать временные и частотные зависимости входных параметров, в результате чего становятся приемлемыми для задач прогнозирования производительности в высокоразмерных задачах с временными и частотными откликами и имеют некоторую способность к экстраполяции. Если априорные знания доступны, их использование в моделировании с помощью нейронных сетей позволяет значительно снизить затраты на генерацию данных и повысить эффективность моделирования. В настоящее время наиболее репрезентативной технологией в этой области является neuro-TF, которая уже активно применяется для анализа частотного отклика структур соединений микросистем и микроволновых устройств. Нейросетевые модели сверхбыстрого прогнозирования SI-характеристик микросистем делают практически реализуемой интеллектуальную многокритериальную оптимизацию целостности сигнала.

Эвристические алгоритмы оптимизации производительности SI-микросистем. В процессе проектирования микросистем существует ряд фиксированных требований, и для их выполнения необходимо оптимизировать параметры проектирования [21]. При уменьшении размеров микросистем и повышении частоты передачи сигналов влияние параметров проектирования структур соединений и микроволновых устройств на разные показатели производительности становится более сложным [28] и требует учитывать компромиссы между этими показателями (например, улучшение одного параметра может привести к ухудшению другого [22]). Таким образом, традиционные методы оптимизации, основанные на эмпирических знаниях и статистических методах, требуют длительного и трудоемкого процесса проб и ошибок [21], и, как следствие, снижаются их эффективность и надежность. В последние годы эвристические алгоритмы оптими-

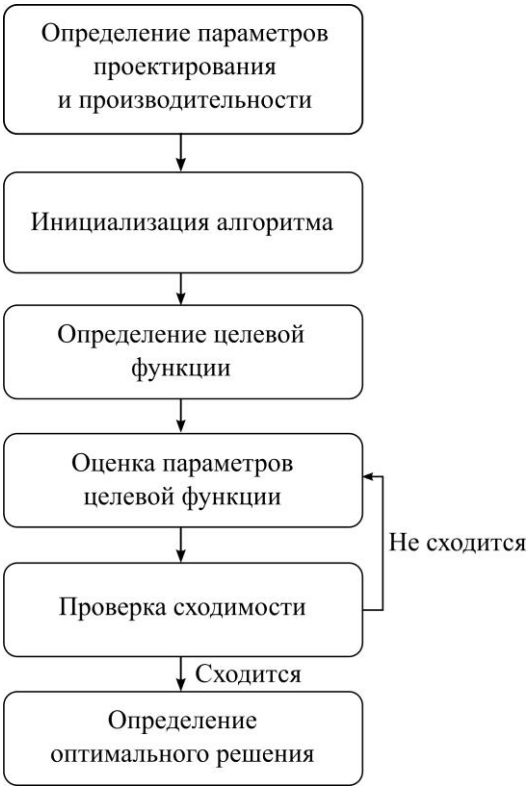


Рис. 3. Блок-схема процесса оптимизации микросистем с использованием методов искусственного интеллекта
Fig. 3. Flowchart of the microsystem optimization process using artificial intelligence methods

зации на основе искусственного интеллекта благодаря своей способности к глобальному и локальному поиску решений нашли широкое применение в задачах оптимизации структур соединений и микроволновых устройств микросистем [21], что значительно повысило эффективность оптимизации дизайна SI-микросистем.

Процесс оптимизации микросистем с использованием методов искусственного интеллекта представлен на рис. 3. Определяются параметры проектирования и параметры производительности, подлежащие оптимизации, и проводится инициализация алгоритма; на основе проектных требований формулируется целевая функция, используемая в качестве функции приспособленности для оптимизационного алгоритма; оценивается качество разных параметров производительности с помощью функции приспособленности; оптимизация завершается, когда ошибка между функцией приспособленности текущего решения и глобально оптимальной функцией приспособленности становится меньше заданного порога или когда количество итераций достигает предустановленного значения.

Генетический алгоритм. Генетический алгоритм представляет собой вычислительную модель, имитирующую процесс естественного отбора и эволюции в теории Дарвина. Исходные особи подвергаются операциям скрещивания и мутации для интеллектуального отбора до тех пор, пока среднее и максимальное значения функции приспособленности не сойдутся, обеспечивая тем самым эффективную оптимизацию. GA включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Инициализация. Инициализация поколения эволюции и популяции.

Шаг 2. Оценка особей. Оценка качества каждой особи в популяции с помощью функции приспособленности.

Шаг 3. Отбор. Выбор лучших особей в популяции.

Шаг 4. Скрещивание. Обмен частями хромосом у отобранных лучших особей для создания нового поколения.

Шаг 5. Мутация. Случайное изменение значений отдельных хромосом у новых особей.

Шаг 6. Условие остановки алгоритма. Алгоритм останавливается, когда количество итераций достигает максимального значения или когда разница между текущим значением функции приспособленности и глобально оптимальным значением становится меньше заданного порога.

В настоящее время GA применяется для оптимизации перекрестных помех [29] и высоты глазковой диаграммы [21] в микросистемах. В [27, 29] приведен GA для опти-

мизации потерь передачи и перекрестных помех в линиях передачи, функция приспособленности определена как линейная сумма ошибок между несколькими параметрами производительности и целевыми характеристиками. Оптимизированные параметры подтверждены с помощью электромагнитного моделирования в CST, что доказало эффективность результатов оптимизации. В [21] показана модель прогнозирования глазковой диаграммы для высокоскоростного канала с использованием DNN. Структура высокоскоростного канала приведена на рис. 4. С помощью GA оптимизированы десять ключевых параметров проектирования. Лучшее значение корреляции – 0,999, результаты оптимизации глазковой диаграммы подтверждены с помощью CST, что показало высокую эффективность GA в многопараметрической совместной оптимизации микросистем. В [29] предложен метод оптимизации характеристик соединений на основе ANN и GA, применение которого позволило сократить время оптимизации с 7,63 до 0,2 ч. Это значительно повысило эффективность процесса. В [30] рассмотрен GA для оптимизации глазковой диаграммы, в результате чего высота и ширина глазковой диаграммы увеличились в 3,07 и 1,06 раза соответственно (рис. 5).

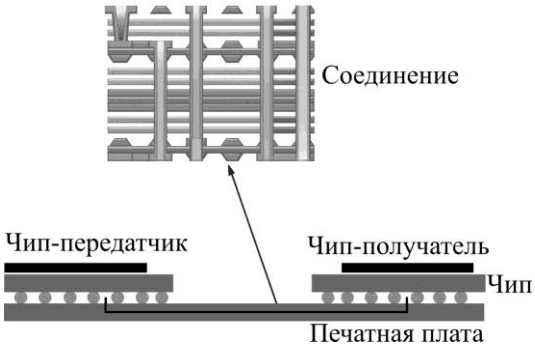


Рис. 4. Схематическое изображение высокоскоростного канала
Fig. 4. Schematic representation of a high-speed channel

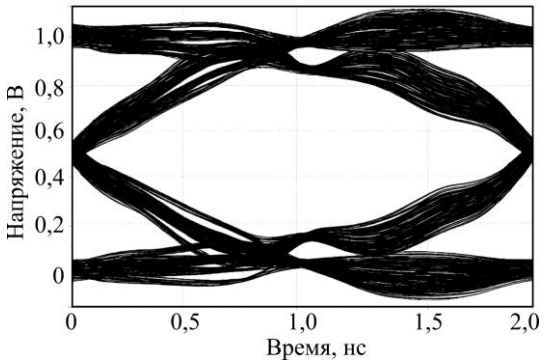


Рис. 5. Результаты оптимизации глазковой диаграммы на основе генетического алгоритма [30]
Fig. 5. Results of eye diagram optimization based on genetic algorithm

В работе [31] для решения проблемы длительного времени оптимизации фильтров предложена модель-заместитель на основе одномерного сверточного автокодировщика с адаптивным онлайн-обновлением. Модель использовалась для помощи PSO в ходе поиска глобального оптимума. В качестве примера оптимизации использовали четырехкамерный фильтр с критериями, при которых возвратные потери в диапазоне частот 2,0143–2,1243 ГГц должны быть не выше –20 дБ. После пяти этапов итераций получен дизайн фильтра, удовлетворяющий требованиям, как показано на рис. 6, что значительно увеличило скорость и повысило эффективность оптимизации фильтра. В [32] представлен метод интеллектуальной совместной оптимизации массива кремниевых сквозных отверстий с уче-

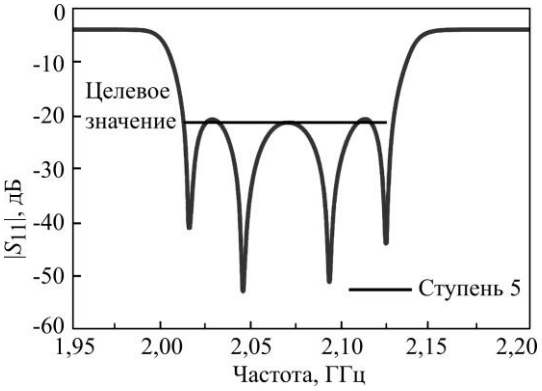


Рис. 6. Результаты оптимизации фильтра на основе алгоритма PSO
Fig. 6. Filter optimization results based on the particle swarm optimization algorithm

том ограничений производительности, позволивший сократить время поиска на 99,52 % и вычислительное время на 83,86 % при потере точности всего на 3,04 %. Этот новаторский подход объединяет методы искусственного интеллекта и проектирования трехмерных интегральных схем, что значительно улучшает эффективность оптимизации дизайна.

Методы оптимизации на основе эволюционных алгоритмов получили широкое применение для оптимизации целостности сигнала в микросистемах. Большинство методов опираются на имеющиеся модели прогнозирования на основе нейронных сетей, это значительно ускоряет процесс итерации. Эволюционные алгоритмы, такие как GA, DE и PSO, разработаны относительно давно, хорошо изучены и при применении несложны. В настоящее время их используют для оптимизации глазковых диаграмм, перекрестных помех и фильтров, что во много раз повышает эффективность оптимизации. Однако из-за структурных особенностей GA количество популяций и время выполнения растут экспоненциально, в результате замедляется вычислительный процесс при увеличении размера популяции или оптимизации в высокоразмерных задачах. Алгоритм DPT-BO использует метод глубокой разбиенческой структуры для быстрого покрытия высокоразмерного пространства и расширяет возможности байесовской оптимизации в высокоразмерных задачах, что делает его приемлемым для совместной оптимизации параметров с высокой размерностью. TSBO делит процесс оптимизации на этапы исследования и точной доработки, как правило, ускоряет сходимость и повышает эффективность процесса оптимизации.

Заключение. Применение нейронных сетей в качестве суррогатных моделей сверхбыстрого SI-анализа существенно сокращает время оценки целостности сигнала, однако для обеспечения приемлемой точности необходим значительный объем размеченных данных обучения.

Для задач прогнозирования целостности сигнала с независимыми параметрами проектирования, небольшим числом проектных и производственных параметров и относительно простой зависимостью между ними могут использоваться ANN или DNN. Если между параметрами проектирования существует корреляция, рекомендуется использовать RNN или CNN. В задачах с физическим смыслом, где требуется обеспечение таких свойств, как причинность и пассивность, необходимо априорно добавлять соответствующие знания для гарантии этих характеристик. При наличии априорных знаний их использование для обучения нейронных сетей может ощутимо повысить эффективность моделирования и улучшить обобщающую способность модели.

На основе моделей прогнозирования, построенных с помощью нейронных сетей, эвристические алгоритмы оптимизации могут быть использованы для повышения эффективности оптимизации SI-микросистем и сокращения цикла проектирования.

Литература / References

1. Traub M., Maier A., Barbehön K. L. Future automotive architecture and the impact of IT trends. *IEEE Software.* 2017;34(3):27–32. https://doi.org/10.1109/MS.2017.69
2. Shan G., Zheng Y., Xing Ch., Chen D., Li G., Yang Y. Architecture of computing system based on chiplet. *Micromachines.* 2022;13(2):205. https://doi.org/10.3390/mi13020205
3. Jeloka S., Cline B., Das S., Labbe B., Rico A., Herberholz R. et al. System technology co-optimization and design challenges for 3D IC. In: *2022 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC).* Newport Beach, CA: IEEE; 2022, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/CICC53496.2022.9772831
4. Naffziger S., Lepak K., Paraschou M., Subramony M. 2.2 AMD chiplet architecture for high-performance server and desktop products. In: *2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference – (ISSCC).* San Francisco, CA: IEEE; 2020, pp. 44–45. https://doi.org/10.1109/ISSCC19947.2020.9063103

5. Pal S., Petrisko D., Kumar R., Gupta P. Design space exploration for chiplet-assembly-based processors. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.* 2020;28(4):1062–1073. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2020.2968904
6. Liu Z., Jiang H., Zhu Z., Chen L., Sun Q., Zhang W. Crosstalk noise of octagonal TSV array arrangement based on different input signal. *Processes.* 2022;10(2):260. https://doi.org/10.3390/pr10020260
7. Kim H., Lee S., Song K., Shin Y., Park D., Park J. et al. A novel interposer channel structure with vertical tabbed vias to reduce far-end crosstalk for next-generation high-bandwidth memory. *Micromachines.* 2022;13(7):1070. https://doi.org/10.3390/mi13071070
8. Patti R. S. Three-dimensional integrated circuits and the future of system-on-chip designs. *Proc. IEEE.* 2006;94(6):1214–1224. https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.873612
9. Beica R. 3D integration: Applications and market trends. In: *2015 International 3D Systems Integration Conference (3DIC).* Sendai: IEEE; 2015, pp. TS5.1.1–TS5.1.7. https://doi.org/10.1109/3DIC.2015.7334567
10. Moore S. K. Chiplets are the future of processors: Three advances boost performance, cut costs, and save power. *IEEE Spectrum.* 2020;57(5):11–12. https://doi.org/10.1109/MSPEC.2020.9078405
11. Zhu L., Chaudhuri A., Banerjee S., Murali G., Vanna-Iampikul P., Chakrabarty K., Lim S. K. Design automation and test solutions for monolithic 3D ICs. *ACM J. Emerging Technol. Comput.* 2022;18(1):1–49. https://doi.org/10.1145/3473462
12. Vijayaraghavan T., Eckert Y., Loh G. H., Schulte M. J., Ignatowski M., Beckmann B. M. et al. Design and analysis of an APU for exascale computing. In: *2017 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA).* Austin, TX: IEEE; 2017, pp. 85–96. https://doi.org/10.1109/HPCA.2017.42
13. Zaruba F., Schuiki F., Benini L. A 4096-core RISC-V chiplet architecture for ultra-efficient floating-point computing. In: *2020 IEEE Hot Chips 32 Symposium (HCS).* Palo Alto, CA: IEEE; 2020, pp. 1–24. https://doi.org/10.1109/HCS49909.2020.9220474
14. Vivet P., Guthmuller E., Thonnart Y., Pillonnet G., Fuguet C., Miro-Panades I. et al. IntAct: A 96-core processor with six chiplets 3D-stacked on an active interposer with distributed interconnects and integrated power management. *IEEE J. Solid-State Circuits.* 2021;56(1):79–97. https://doi.org/10.1109/JSSC.2020.3036341
15. Fotouhi P., Werner S., Lowe-Power J., Ben Yoo S. J. Enabling scalable chiplet-based uniform memory architectures with silicon photonics. In: *MEMSYS'19: Proceedings of the International Symposium on Memory Systems.* New York: ACM; 2019, pp. 222–234. https://doi.org/10.1145/3357526.3357564
16. Shulaker M. M., Hills G., Park R. S., Howe R. T., Saraswat K., Wong H.-S. P., Mitra S. Three-dimensional integration of nanotechnologies for computing and data storage on a single chip. *Nature.* 2017;547:74–78. https://doi.org/10.1038/nature22994
17. Tang W., Cho S.-G., Hoang T. T., Botimer J., Zhu W. Q., Chang C.-C. et al. Arvon: A heterogeneous system-in-package integrating FPGA and DSP chiplets for versatile workload acceleration. *IEEE J. Solid-State Circuits.* 2024;59(4):1235–1245. https://doi.org/10.1109/JSSC.2023.3343457
18. Zhang N., Liang K., Liu Z., Sun T., Wang J. ANN-based instantaneous simulation of particle trajectories in microfluidics. *Micromachines.* 2022;13(12):2100. https://doi.org/10.3390/mi13122100
19. Peng X., Kaul A., Bakir M. S., Yu S. Heterogeneous 3-D integration of multitier compute-in-memory accelerators: An electrical-thermal co-design. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2021;68(11):5598–5605. https://doi.org/10.1109/TED.2021.3111857
20. Li L., Jiang L., Zhang J., Wang S., Chen F. A complete YOLO-based ship detection method for thermal infrared remote sensing images under complex backgrounds. *Remote Sens.* 2022;14(7):1534. https://doi.org/10.3390/rs14071534
21. Medico R., Spina D., Vande Ginste D., Deschrijver D., Dhaene T. Machine-learning-based error detection and design optimization in signal integrity applications. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2019;9(9):1712–1720. https://doi.org/10.1109/TCPMT.2019.2916902
22. Beruvides G., Quiza R., Rivas M., Castaño F., Haber R. E. Online detection of run out in microdrilling of tungsten and titanium alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014;74:1567–1575. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6091-1
23. Swaminathan M., Torun H. M., Yu H., Hejase J. A., Becker W. D. Demystifying machine learning for signal and power integrity problems in packaging. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2020;10(8):1276–1295. https://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.3011910
24. Beyene W. T. Application of artificial neural networks to statistical analysis and nonlinear modeling of high-speed interconnect systems. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 2007;26(1):166–176. https://doi.org/10.1109/TCAD.2006.882518

25. Ooi K. S., Kong C. L., Goay C. H., Ahmad N. S., Goh P. Crosstalk modeling in high-speed transmission lines by multilayer perceptron neural networks. *Neural Comput. & Applic.* 2020;32:7311–7320. https://doi.org/10.1007/s00521-019-04252-3
26. Ambasana N., Anand G., Gope D., Mutnury B. S-parameter and frequency identification method for ANN-based eye-height/width prediction. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2017;7(5):698–709. https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2661065
27. Kim H., Sui C., Cai K., Sen B., Fan J. Fast and precise high-speed channel modeling and optimization technique based on machine learning. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2018;60(6):2049–2052. https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2782704
28. Li N., Mao J., Zhao W.-S., Tang M., Yin W.-Y. High-frequency electrothermal characterization of TSV-based power delivery network. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2018;8(12):2171–2179. https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2853405
29. Zhu H.-R., Zhao Y.-L., Lu J.-G. A novel vertical wire-bonding compensation structure adaptively modeled and optimized with GRNN and GA methods for system in package. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2021;63(6):2082–2092. https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3064853
30. Odaira T., Yokoshima N., Yoshihara I., Yasunaga M. Evolutionary design of high signal integrity interconnection based on eye-diagram. *Artif. Life Robotics.* 2018;23:298–303. https://doi.org/10.1007/s10015-018-0433-2
31. Zhang Y., Wang X., Wang Y., Yan N., Feng L., Zhang L. Accurate design of microwave filter based on surrogate model-assisted evolutionary algorithm. *Electronics.* 2022;11(22):3705. https://doi.org/10.3390/electronics11223705
32. Li G., Shan G., Meng B., Zheng Y., Yang Y. Intelligent multifield collaborative optimization method for TSV array with performance constraints. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2023;70(9):4772–4778. https://doi.org/10.1109/TED.2023.3296686

Информация об авторах

Шань Гуанбао – доктор наук, профессор факультета интегральных схем Сианьского университета электронных наук и технологий (Китай, г. Сиань, 710126, Шэньси, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), 18092060235@189.cn

Ли Голян – научный сотрудник факультета интегральных схем Сианьского университета электронных наук и технологий (Китай, г. Сиань, 710126, Шэньси, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), liguoliang@xidian.edu.cn

Ван Юйсюань – докторант факультета интегральных схем Сианьского университета электронных наук и технологий (Китай, г. Сиань, 710126, Шэньси, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), 23111110540@stu.xidian.edu.cn

Ци Пэйхан – профессор факультета инженерии связи Сианьского университета электронных наук и технологий (Китай, г. Сиань, 710126, Шэньси, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), phqi@xidian.edu.cn

Гончаренко Владимир Иванович – доктор технических наук, доцент Военного института Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), GoncharenkoVI@mai.ru

Волков Алексей Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), leshvol@mail.ru

Муратчаев Султансаид Султанханович – старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), said.muratchaev@gmail.com

Information about the authors

Shan Guangbao – Dr. Sci., Prof. of the Faculty of Integrated Circuits, Xidian University (China, 710126, Xi'an, Shaanxi, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), 18092060235@189.cn

Li Guoliang – Research Associate of the Faculty of Integrated Circuits, Xidian University (China, 710126, Xi'an, Shaanxi, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), liguoliang@xidian.edu.cn

Wang Yuxuan – Postdoctoral student of the Faculty of Integrated Circuits, Xidian University (China, 710126, Xi'an, Shaanxi, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), 23111110540@stu.xidian.edu.cn

Qi Peihan – Professor of the Faculty of Communication Engineering, Xidian University (China, 710126, Xi'an, Shaanxi, 266 Xinglong Section of Xifeng Road), phqi@xidian.edu.cn

Vladimir I. Goncharenko – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Military Institute, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe hwy, 4), GoncharenkoVI@mai.ru

Aleksey S. Volkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), leshvol@mail.ru

Sultansaid S. Muratchaev – Senior Lecturer of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), said.muratchaev@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 19.12.2024
Поступила после рецензирования / Revised 10.06.2025
Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

Уважаемые авторы!

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

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
BRIEF REPORTS

Краткое сообщение
УДК 621.382.3
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-806-812
EDN: KBVQGQ

Экстракция параметров модели интегральной катушки индуктивности для технологического процесса GaN на кремнии

А. И. Хлыбов, Д. В. Родионов*, Е. Ю. Котляров, В. В. Лосев, В. И. Егоркин

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

* *denis.rodionov@gmail.com*

Аннотация. Нитрид галлия GaN и соединения на его основе, в частности $Al_xGa_{1-x}N$, являются перспективными полупроводниками для мощных и высокочастотных устройств. Активно развивающиеся технологии на основе GaN ориентированы главным образом на разработку аналоговых СВЧ-микросхем, поэтому создание моделей пассивных компонентов СВЧ-тракта и экстракция параметров этих моделей – актуальная задача. В работе предложена модель интегральной катушки индуктивности для технологического процесса GaN на кремнии. Получены аналитические выражения для эффективной индуктивности, входного импеданса, добротности, на основе которых разработана методика экстракции электрических параметров модели катушки из экспериментальных данных. Результаты измерений и моделирования параметров интегральной катушки индуктивности показали хорошее совпадение в диапазоне частот 0,01–10,0 ГГц. Рассмотренная методика экстракции может быть использована при разработке технологических библиотек GaN на кремнии.

Ключевые слова: интегральная катушка индуктивности, GaN HEMT, модель катушки индуктивности, скин-эффект, S-параметры, экстракция параметров

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00771).

Для цитирования: Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Котляров Е. Ю., Лосев В. В., Егоркин В. И. Экстракция параметров модели интегральной катушки индуктивности для технологического процесса GaN на кремнии. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(6):806–812. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-806-812. EDN: KBVQGQ.

© А. И. Хлыбов, Д. В. Родионов, Е. Ю. Котляров, В. В. Лосев, В. И. Егоркин, 2025

Brief report

Parameter extraction of the integrated inductance coil model for GaN-on-Si technology process

A. I. Khlybov, D. V. Rodionov*, E. Yu. Kotlyarov, V. V. Losev, V. I. Egorkin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *denis.rodionov@gmail.com*

Abstract. Gallium nitride GaN and compounds based on it, in particular $Al_xGa_{1-x}N$, are promising semiconductors for power RF devices. Actively developing GaN based technologies are mainly oriented to analog micro- and millimeter-wave integrated circuits development, thus the relevant objective is to develop RF path passive components' models and to extract its parameters. In this work, an integrated spiral inductor model for GaN-on-Si technology process is proposed. The analytical equations for effective inductance, input impedance, and quality factor were obtained, on the base of which the procedure of electrical parameters extraction from experimental data has been developed. The results of integrated inductance coil parameters measurement and simulation have shown good matching in the range 0.01 to 10.0 GHz. The proposed procedure can be applied to PDK development for GaN-on-Si technology processes.

Keywords: integrated inductance coil, GaN HEMT, spiral inductor model, skin-effect, S-parameters, parameters extraction

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-19-00771).

For citation: Khlybov A. I., Rodionov D. V., Kotlyarov E. Yu., Losev V. V., Egorkin V. I. Parameter extraction of the integrated inductance coil model for GaN-on-Si technology process. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(6):806–812. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-6-806-812.

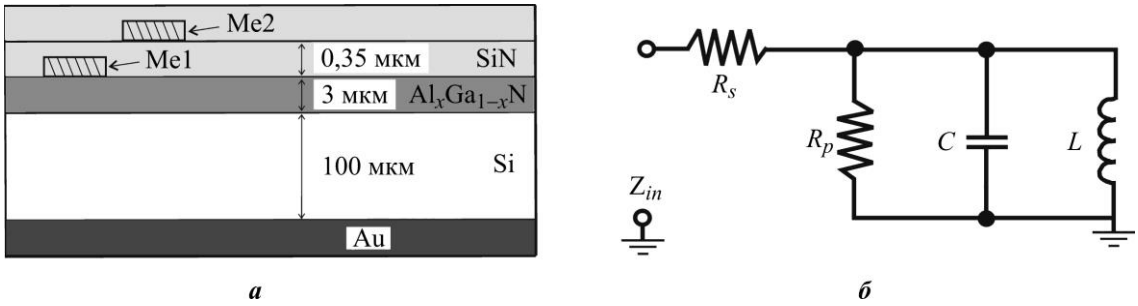
Нитрид галлия GaN и соединения на его основе, например $Al_xGa_{1-x}N$, являются перспективными полупроводниками для мощных и высокочастотных устройств. Технологии на основе GaN ориентированы в основном на разработку аналоговых микросхем СВЧ-диапазона частот и пассивных элементов [1] тракта. Создание и верификация аналитических [2] и численных [4] моделей [3] пассивных компонентов, а также экстракция их параметров – актуальная задача.

В настоящей работе рассматривается методика экстракции параметров модели интегральных катушек индуктивности, изготовленных в технологическом процессе GaN на кремнии. Предлагается модель катушки индуктивности, изготовленной в технологическом процессе 0,25 мкм GaN HEMT на подложке кремния, предназначенном для разработки СВЧ-микросхем в диапазоне частот до 10 ГГц. Схематическое изображение сечения структуры GaN на кремнии показано на рис. 1, *а*; на рис. 1, *б* приведена эквивалентная электрическая схема модели планарной катушки индуктивности с заземленным выводом.

Эквивалентное сопротивление R_p моделирует потери в кремниевой подложке. Эквивалентная емкость C включает в себя межвитковую емкость катушки и емкость проводника катушки на подложку.

Входной импеданс схемы (см. рис. 1, *б*) рассчитывается согласно выражению

$$Z_{in} = \frac{R_s\left[R_p^2(1-\omega^2LC)^2+(\omega L)^2\right]+R_p(\omega L)^2}{R_p^2(1-\omega^2LC)^2+(\omega L)^2} + \frac{j\omega LR_p^2(1-\omega^2LC)}{R_p^2(1-\omega^2LC)^2+(\omega L)^2}.$$



а *б*

Рис. 1. Схематическое изображение сечения структуры GaN на Si (*а*) и эквивалентная схема интегральной катушки индуктивности с заземленным выводом (*б*): R_s – омическое сопротивление проводника катушки; R_p – эквивалентное сопротивление; C – эквивалентная емкость; L – индуктивность катушки; Z_{in} – входной импеданс

Fig. 1. Crossection of the GaN on Si structure (*a*) and equivalent circuit of the integrated spiral inductor with grounded output (*b*): R_s – ohmic resistance of the coil conductor; R_p – equivalent resistance; C – equivalent capacitance; L – the coil inductance; Z_{in} – input impedance

Модуль входного импеданса равен:

$$|Z_{in}| = \frac{\sqrt{\left\{R_s\left[R_p^2(1-\omega^2LC)^2+(\omega L)^2\right]+R_p(\omega L)^2\right\}^2+\left[\omega LR_p^2(1-\omega^2LC)\right]^2}}{R_p^2(1-\omega^2LC)^2+(\omega L)^2}, \quad (1)$$

добротность интегральной катушки индуктивности определяется следующим образом:

$$Q = \left|\frac{\operatorname{Im} Z_{in}}{\operatorname{Re} Z_{in}}\right| = \left|\frac{\omega LR_p^2(1-\omega^2LC)}{R_s\left[R_p^2(1-\omega^2LC)^2+(\omega L)^2\right]+R_p(\omega L)^2}\right|. \quad (2)$$

Исходя из выражений (1), (2) при резонансной частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ модуль входного импеданса будет равен $R_s + R_p$, а добротность равна нулю.

Выражение для эффективной индуктивности катушки имеет вид

$$L_{eff} = \frac{\operatorname{Im} Z_{in}}{\omega} = \frac{LR_p^2(1-\omega^2LC)}{R_p^2(1-\omega^2LC)^2+(\omega L)^2}. \quad (3)$$

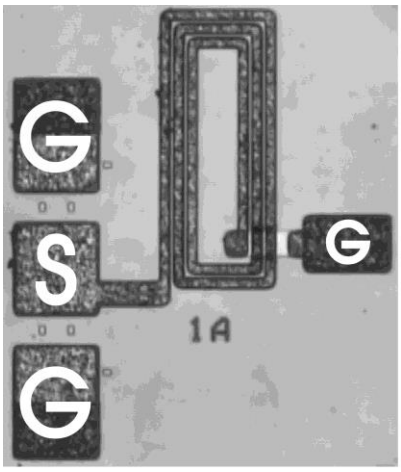


Рис. 2. Микрофотография экспериментального образца тестовой структуры с интегральной катушкой индуктивности

Fig. 2. Photo of the test structure with integrated inductance coil

Из выражения (3) полагается, что при малых значениях ω эффективная индуктивность L_{eff} стремится к значению индуктивности L.

Методика определения параметров эквивалентной схемы на основе экспериментальных данных включает в себя следующие процедуры.

Из полученных значений матрицы S-параметров реальной катушки индуктивности с использованием программных продуктов Cadence AWR устанавливаем зависимости эффективной индуктивности, входного импеданса и добротности как функции частоты. Для повышения уровня точности внутреннее омическое сопротивление катушки индуктивности R_0 определено из статических ВАХ, а не из параметров рассеяния. Находим резонансную частоту $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, при которой добротность имеет нулевое значение.

Определяем L из L_{eff} на низкой частоте (0,1–0,5 ГГц). Тогда емкость конденсатора C рассчитывается как

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L}.$$

Согласно формуле (1) при резонансной частоте Z_{in} имеет максимальное значение $R_{max} = R_s + R_p$. Омическое сопротивление R_s для проводника прямоугольного сечения с учетом скин-эффекта определяется из выражений:

$$R_s = R_0 \text{ для } \delta > d, \quad R_s \approx \frac{R_0 w d}{\delta(w + d - \delta)} \text{ для } \delta < d,$$

где δ – глубина скин-эффекта [5]; d – толщина металлизации проводника; w – ширина металлизации проводника.

Эквивалентное сопротивление $R_p = R_{max} - R_s$.

Микрофотография экспериментального образца тестовой структуры с интегральной катушкой индуктивности, выполненной в технологическом процессе GaN на кремнии, приведена на рис. 2.

Состав и основные параметры катушки индуктивности:

Число витков N 3
Ширина витка w ..... 12 мкм
Зазор между витками s ..... 8 мкм
Длина всех витков l ..... 2700 мкм
Толщина металлизации d ..... 3 мкм
Удельное сопротивление металлизации ρ .....$2{,}4 \cdot 10^{-7}$ Ом·м

Проводники катушки индуктивности и контактные площадки для СВЧ-измерений выполнены в верхнем слое металлизации на основе золота. Проводники общего вывода G (см. рис. 2) и контактные площадки для подключения общего вывода СВЧ-зондов G-S-G через переходные отверстия соединены между собой металлизированной поверхностью на обратной стороне кристалла.

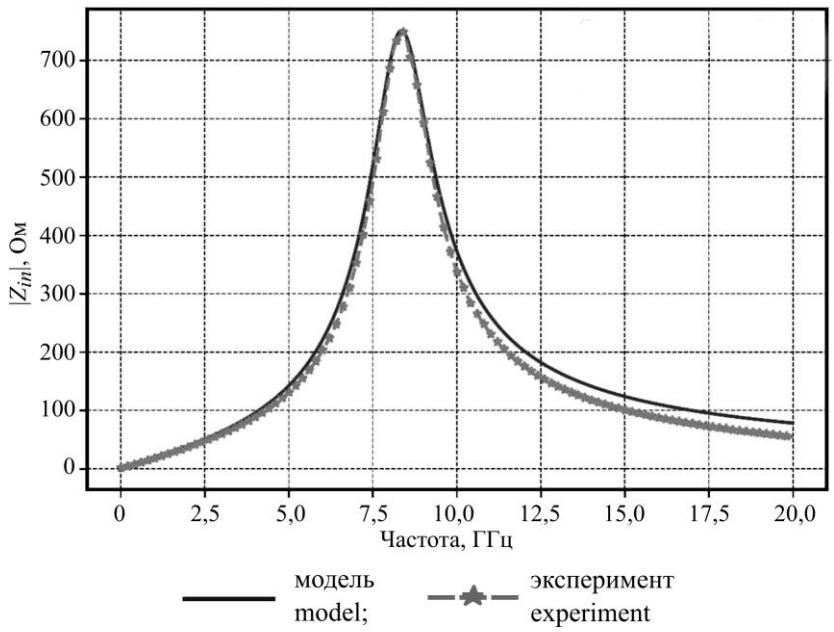


Рис. 3. Зависимость модуля входного импеданса от частоты
Fig. 3. Input impedance module as function of frequency

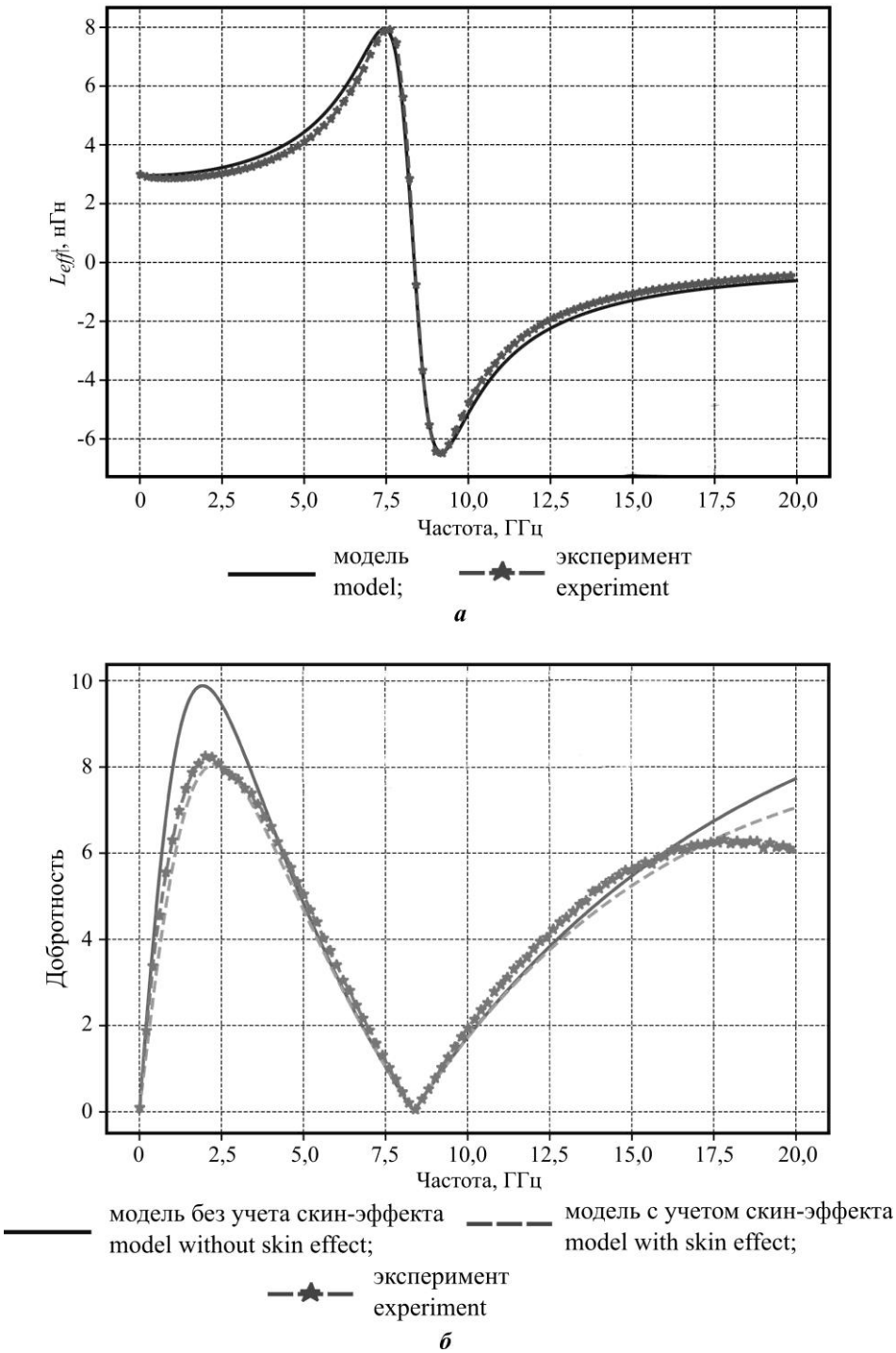


Рис. 4. Зависимости эффективной индуктивности (*а*) и добротности (*б*) от частоты
Fig. 4. Effective inductance (*a*) and quality factor (*b*) as functions of frequency

В соответствии с изложенной методикой определены на основе экспериментальных данных параметры модели интегральной катушки индуктивности: L = 2,95 нГн; C = 123 фФ; R_p = 746 Ом; R_0 = 1,91 Ом.

Сравнительные характеристики параметров интегральной катушки индуктивности, полученные по результатам измерений и рассчитанные из выражений (1)–(3), представлены на рис. 3 и 4. Как видно из рис. 4, *б*, существенное влияние на добротность катушки оказывает скин-эффект, приводящий к увеличению последовательного сопротивления в катушке индуктивности и, соответственно, к снижению добротности.

Несмотря на относительную простоту модели, результаты измерений и моделирования параметров интегральной катушки индуктивности показали хорошее совпадение в диапазоне частот 0,01–10 ГГц. Ошибка по определению L_{eff} до частоты резонанса не превышает 5 %. Данная методика экстракции может быть использована при разработке технологических библиотек GaN на кремнии.

Литература / References

1. Eblabla A., Li X., Wallis D. J., Guiney I., Elgaid K. High-performance MMIC inductors for GaN-on-low-resistivity silicon for microwave applications. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2018;28(2):99–101. https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2790705
2. Montesdeoca M. S. M., Angulo S. M., Duarte D. M., Pino J. del, Garcia Y Garcia J. A., Khemchandani S. L. An analytical scalable lumped-element model for GaN on Si inductors. *IEEE Access.* 2020;8:52863–52871. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980926
3. Spataro S., Sapone G., Giuffrida M., Ragonese E. A geometrically scalable lumped model for spiral inductors in radio frequency GaN technology on silicon. *Electronics.* 2024;13(13):2665. https://doi.org/10.3390/electronics13132665
4. Сальников А. С., Горяинов А. Е., Добуш И. М., Калентьев А. А., Гарайс Д. В. Численно-аналитические методики для быстрого построения моделей интегральных GaAs- и Si-катушек индуктивности. In: *Электронные средства и системы управления:* материалы докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. (29 нояб. – 1 дек. 2017): в 2 ч. Ч. 1. Томск: В-Спектр; 2017, с. 72–75. EDN: ZWNKIB.
   Sal'nikov A. S., Goryainov A. E., Dobush I. M., Kalent'ev A. A., Garays D. V. Numerical analytic procedures for fast model-building of integral GaAs and Si induction coils. In: *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya:* proceedings of 13th International res.-to-pract. conf. (Nov. 29 – Dec. 1, 2017): in 2 parts. Pt. 1. Tomsk: B-Spektr Publ.; 2017, pp. 72–75. (In Russ.).
5. Ерохин В. В. Верификация модели интегральной катушки индуктивности для СВЧ LC-фильтров в Si- и SiGe-системах на кристалле. *Вестник СибГУТИ.* 2022;(2):94–109. https://doi.org/10.55648/1998-6920-2022-16-2-94-109. EDN: IKXZUE.
   Erokhin V. V. Integrated inductor model verification for microwave LC-filters in Si and SiGe systems on a chip. *Vestnik SibGUTI.* 2022;(2):94–109. (In Russ.). https://doi.org/10.55648/1998-6920-2022-16-2-94-109

Информация об авторах

Хлыбов Александр Иванович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alex1818@yandex.ru

Родионов Денис Владимирович – ведущий инженер Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), denis.rodionov@gmail.com

Котляров Евгений Юрьевич – аспирант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ekotlyarov86@gmail.com

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dsd@miee.ru

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, доцент Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), egorkinvi1962@mail.ru

Information about the authors

Alexander I. Khlybov – Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alex1818@yandex.ru

Denis V. Rodionov – Senior Engineer of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), denis.rodionov@gmail.com

Evgeniy Yu. Kotlyarov – PhD student of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ekotlyarov86@gmail.com

Vladimir V. Losev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dsd@miee.ru

Vladimir I. Egorkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), egorkinvi1962@mail.ru

Поступило в редакцию / Received 02.04.2025
Поступило после рецензирования / Revised 26.06.2025
Принято к публикации / Accepted 08.10.2025

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

ЮБИЛЕИ

Горбацевичу Александру Алексеевичу – 70 лет



21 ноября 2025 г. исполнилось 70 лет Горбацевичу Александру Алексеевичу, академику РАН, доктору физико-математических наук, профессору, известному специалисту в области физики конденсированного состояния и наноэлектроники.

В 1979 г. А. А. Горбацевич окончил физико-технический факультет Московского института электронной техники (МИЭТ). В 1982 г. Александр Алексеевич защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в 1991 г. – на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. В 2008 г. А. А. Горбацевич избран членом-корреспондентом РАН, в 2019 г. – академиком РАН по Отделению нанотехнологий и информационных технологий.

В МИЭТ Александр Алексеевич работает с 1982 г.: младший научный сотрудник, старший научный сотрудник, ассистент, доцент, профессор (1982–1999), заведующий кафедрой квантовой физики и наноэлектроники (1999–2023), с 2023 г. – профессор Института интегральной электроники им. К. А. Валиева МИЭТ.

С 1996 по 2008 г. А. А. Горбацевич – исполнительный директор Научно-образовательного центра Физического института имени П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) и МИЭТ «Квантовые приборы и нанотехнологии», с 2008 по 2009 г. – заместитель председателя Санкт-Петербургского физико-технологического научно-образовательного центра РАН, с 2010 по 2011 г. – первый проректор по науке и образованию Санкт-Петербургского Академического университета – научно-образовательного центра нанотехнологий РАН, с 2011 г. – главный научный сотрудник, руководитель лаборатории квантового дизайна молекулярных и твердотельных наноструктур ФИАН, с 2017 г. – главный научный сотрудник АО «НИИМЭ».

А. А. Горбацевичем получены фундаментальные приоритетные научные результаты в области физики конденсированного состояния и наноэлектроники. Под его руководством выполнен ряд опытно-конструкторских работ по разработке сверхбыстродействующей элементной базы микро- и наноэлектроники на основе полупроводниковых гетероструктур соединений А3В5.

Александр Алексеевич Горбацевич – заместитель председателя Научного совета РАН «Квантовые технологии» и заместитель председателя ВАК при Минобрнауки России, член редколлегий журналов «Микроэлектроника», «Российские нанотехнологии», «Известия вузов. Элек-

троника», «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

Результаты научных исследований А. А. Горбацевича изложены более чем в 100 научных публикациях. Под руководством А. А. Горбацевича подготовлено 5 кандидатов наук.

Многолетняя плодотворная научно-педагогическая деятельность А. А. Горбацевича высоко оценена государством. Он награжден орденом Дружбы, медалями «300 лет Российской академии наук», «За доблестный труд и отличие», ему присвоены звания «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации» и «Почетный работник электронной промышленности». А. А. Горбацевич удостоен звания лауреата премии Правительства Российской Федерации в области образования.

Поздравляем Александра Алексеевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и дальнейшей плодотворной работы на благо российской науки!

Редколлегия

Тельцу Виталию Арсеньевичу – 70 лет



13 сентября 2025 г. исполнилось 70 лет Тельцу Виталию Арсеньевичу, доктору технических наук, профессору, специалисту в области электронной компонентной базы и радиационно стойкой электроники, директору Центра экстремальной прикладной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

В 1977 г. В. А. Телец окончил Киевское высшее военное инженерное дважды Краснознаменное училище связи им. М. И. Калинина с квалификацией военного радиоинженера.

В 1989 г. В. А. Телец защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 1999 г. – диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В 2004 г. В. А. Тельцу присвоено ученое звание профессора.

Область научных интересов Виталия Арсеньевича – микроэлектроника, микросистемная техника, радиационная стойкость и доверенность электронной компонентной базы.

В. А. Телец – член редакционных коллегий журналов «Миро- и наносистемная техника», «Известия вузов. Электроника», «Наноиндустрия» и др.

Основные результаты научной работы В. А. Тельца представлены более чем в 250 научных публикациях, из них 8 монографий, 5 учебных пособий, более 10 нормативных документов, более 10 патентов, свидетельств на изобретения, полезные модели, в том числе в соавторстве.

В. А. Телец – дважды лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, трижды стипендиат по Постановлению Правительства Российской Федерации, ему присвоены звания «Почетный работник науки и техники Российской Федерации», «Почетный работник РАСУ», «Почетный работник радиоэлектронной промышленности», имеет знаки отличия министерств, государственных корпораций, субъектов Российской Федерации.

Поздравляем Виталия Арсеньевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов в научной деятельности!

Редколлегия

Громову Дмитрию Геннадьевичу – 60 лет



22 октября 2025 г. исполнилось 60 лет Громову Дмитрию Геннадьевичу, доктору технических наук, профессору, специалисту в области технологий СБИС, наноматериалов и нанотехнологий.

В 1990 г. Д. Г. Громов окончил Московский институт электронной техники (МИЭТ) по специальности «Полупроводники и диэлектрики». В 1996 г. Дмитрий Геннадьевич защитил диссертацию на тему «Исследование и разработка технологии получения термостабильных слабопроникающих контактных систем кремниевых ИС» на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 2001 г. – диссертацию на тему «Материалы и процессы формирования многослойной металлизации кремниевых СБИС» на соискание ученой степени доктора технических наук. В 2010 г. Д. Г. Громову присвоено ученое звание профессора.

В МИЭТ Дмитрий Геннадьевич работает с 1990 г.: инженер-стажер кафедры физико-химических основ технологии микроэлектроники (1990–1992), профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники (2001–2009), заведующий кафедрой материалов и процессов твердотельной электроники (2009–2012), профессор кафедры материалов функциональной электроники (2012–2017). С 2017 г. по настоящее время Д. Г. Громов – профессор Института перспективных материалов и технологий МИЭТ.

Область научных интересов профессора Д. Г. Громова – тонкие пленки металлов и сплавов, их получение и свойства; твердофазное взаимодействие, фазовые переходы, физическая химия наноразмерных систем; технология интегральных схем; материалы и процессы формирования наноструктур.

Д. Г. Громов – ученый секретарь диссертационного совета 24.2.342.02, член диссертационного совета 24.2.342.01 МИЭТ, экспертного совета ВАК по химической технологии, входит в состав редколлегии журнала «Известия вузов. Электроника».

Дмитрий Геннадьевич – автор более 300 научных трудов, из них 3 монографии и 20 патентов на изобретения. Под руководством Д. Г. Громова подготовлено 8 кандидатов наук.

В 2016 г. Д. Г. Громову присвоено почетное звание лауреата премии Правительства Российской Федерации в области образования.

Поздравляем Дмитрия Геннадьевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов в научной и педагогической деятельности!

Редколлегия

Тематический указатель статей, опубликованных в 2025 году

Фундаментальные исследования

Верюжский И. В., Приходько А. С., Усков Ф. А., Григорашвили Ю. Е., Боргардт Н. И. Импульсное лазерное осаждение и исследование методами электронной микроскопии гетероструктуры на основе сплава Гейслера CoFeMnSi и кобальта. **Т. 30, № 5, с. 543–551.**

Лавров И. В., Бардушкин В. В., Яковлев В. Б., Мигунова Е. С. Концентрация напряженности температурного поля на поверхности включений графена в композите с полимерной матрицей. **Т. 30, № 3, с. 259–273.**

Лекомцев П. С., Сибатов Р. Т. Резервуарные вычисления на основе полупроводниковой системы с прыжковым транспортом. **Т. 30, № 4, с. 391–399.**

Подорожний О. В., Киреев Г. С., Кузнецов В. А., Решетняк А. Р., Румянцев А. В. Электронно-микроскопические исследования монокристаллического кремния после облучения ионами ксенона низких энергий. **Т. 30, № 6, с. 683–693.**

Румянцев А. В., Боргардт Н. И., Волков Р. Л. Влияние стратегии сканирования фокусированного ионного пучка на процесс распыления кремния при формировании микро- и наноструктур. **Т. 30, № 4, с. 400–410.**

Материалы электроники

Аникин А. В., Громов Д. Г., Лебедев Е. А., Боргардт Н. И., Волков Р. Л., Лавров И. В., Силибин М. В., Дубков С. В., Вигдорович Е. Н., Павликов А. В., Комленок М. С., Курочицкий Н. Д., Громов В. Д., Рязанов Р. М., Крохан Н. В., Шарипов Р. А., Новикова О. В., Гаврилов С. А., Подорожний О. В. Исследование процессов формирования и стабильности фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si для фотошаблонов под воздействием глубокого ультрафиолетового излучения с длиной волны 248 нм. **Т. 30, № 5, с. 552–565.**

Бардушкин А. В., Яковлев В. Б. Моделирование напряженного состояния структур por-Si – H_2O в окрестности точки фазового перехода воды. **Т. 30, № 2, с. 127–139.**

Бойко А. Н., Кочергин М. Д., Вертянов Д. В., Гаев Д. С., Пебалк Д. В. Мемристорные эффекты и анизотропия в композите полиимид – TiV с нитевидными проводящими каналами. **Т. 30, № 4, с. 422–431.**

Борисов А. Г., Вертянов Д. В., Ильяшева Е. В., Осипенкова Н. Г., Тимошенков С. П. Особенности свойств полимерных композитов на основе наноразмерной дисперсной фазы. **Т. 30, № 5, с. 566–574.**

Бутманов Д. Д., Прудникова М. Ю., Самсонов С. С., Новиков Д. В., Савчук Т. П., Дронова Д. А. Исследование зависимости структуры, состава и фотоэлектрохимических свойств нанотрубок анодного оксида титана от времени синтеза и температуры последующей обработки. **Т. 30, № 4, с. 411–421.**

Бычков Д. В., Петров В. С., Ли И. П. Расчет параметров нитевидных кристаллов, сформированных на поверхности автоэлектронных катодов магнетронов с безнакальным запуском. **Т. 30, № 1, с. 7–15.**

Волков Р. Л., Киреев Г. С., Подорожний О. В., Решетняк А. Р., Аникин А. В., Боргардт Н. И. Характеризация наноразмерных слоев гетерокомпозиций с применением цифровой обработки данных просвечивающей электронной микроскопии. **Т. 30, № 6, с. 707–720.**

Кружалина М. Д., Тарасов А. М., Дронова Д. А., Волкова Л. С., Трегубов А. В., Журина Е. С., Шабаева Е. Н., Дубков С. В., Громов Д. Г. Гидротермальный синтез композитных наноструктур $TiO_2/SrTiO_3$ для применения в фотокатализе. **Т. 30, № 3, с. 274–286.**

Назаркина Ю. В., Шитова Д. Д., Дронов А. А., Еганова Е. М. Исследование влияния гидродинамических условий формирования на морфологию и фотокаталитические свойства анодного оксида вольфрама. **Т. 30, № 5, с. 575–585.**

Титов А. Ю., Вертянов Д. В., Артюшин Д. И., Коровина А. Ю., Коробова Н. Е., Рабцевич В. А., Гладкова С. И. Анализ влияния интерметаллидных фаз Al_xAu_y и Al_xCu_y на надежность микросварных соединений интегральных микросхем. **Т. 30, № 6, с. 694–706.**

Хамдохов З. М., Маргушев З. Ч., Калажоков З. Х., Калажоков Х. Х. Влияние облучения ионами N^+, Ar^+, He^+ на структуру коллоидного графита. **Т. 30, № 3, с. 287–292.**

Штерн М. Ю., Шерченков А. А., Штерн Ю. И., Бабич А. В., Рогачев М. С., Бабич Т. А., Марончук И. И. Исследование стабильности свойств низкотемпературных наноструктурированных термоэлектрических материалов на основе BiTeSe и BiSbTe. **Т. 30, № 2, с. 140–148.**

Технологические процессы и маршруты

Волощук И. А., Терехов Д. Ю., Штерн М. Ю., Шерченков А. А. Технология формирования гибкого термоэлектрического генератора методом трафаретной печати модифицированных суспензий на основе твердых растворов Bi_2Te_3-Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3-Sb_2Te_3. **Т. 30, № 1, с. 16–23.**

Гагарина Л. Г., Шевнина Ю. С., Семенов М. Ю., Царапкин С. Ф., Минаков Е. И. Предиктивные модели производственных процессов микроэлектроники с учетом стохастических факторов. **Т. 30, № 5, с. 586–596.**

Горностаев П. А., Менагаришвили В. М., Кубраков Р. В. Исследования однородности температуры подложки в установке вакуумно-плазменного травления. **Т. 30, № 2, с. 149–161.**

Жимантас Д. К. Сравнительный анализ использования методов управления качеством в условиях инновационного территориального кластера. **Т. 30, № 1, с. 24–31.**

Корчагин Е. П., Штерн Ю. И., Лавренова А. М., Штерн М. Ю., Рогачев М. С., Бабич А. В. Высокотемпературные контактные системы W-Co/Ag-Zn для термоэлементов. **Т. 30, № 3, с. 293–302.**

Кульпинов М. С., Путря М. Г., Голишников А. А., Балашов А. Г. Причины возникновения LER-эффекта и методы его минимизации при изготовлении ИС. **Т. 30, № 5, с. 597–606.**

Манилова Г. В., Трактирщиков В. С., Ширяев М. Е. Расчет пондеромоторной силы электростатического прижима монополярного типа в установке плазмохимического травления. **Т. 30, № 4, с. 442–450.**

Чумаченко Ю. В., Володченко М. А., Новиков Д. В., Тарасов А. М., Дубков С. В. Формирование и исследование гибких ГКР-подложек методом робокастинга. **Т. 30, № 4, с. 432–441.**

Шевнина Ю. С., Зайцев В. В., Винокуров А. А., Хвостик П. М., Конюхов Е. В. Адаптивное управление совмещением и позиционированием элементов при автоматизации сборочных операций. **Т. 30, № 3, с. 303–312.**

Элементы интегральной электроники

Зеневич А. О., Кочергина О. В., Буслюк В. В., Федосюк Д. Н., Лущий Д. А. Исследование зависимости амплитудных характеристик шумовых диодов от температуры. **Т. 30, № 1, с. 32–39.**
Ильичев Э. А., Петрухин Г. Н., Рычков Г. С., Демидова А. Н., Корляков Д. А. Исследование резонансно-туннельного диода Ван-дер-Ваальса в режиме, совмещающем функции триггера и генератора. **Т. 30, № 4, с. 451–468.**

Схемотехника и проектирование

Волобуев П. С., Коршунов А. В. Безъемкостный регулятор напряжения для распределенных сетей питания ИС. **Т. 30, № 6, с. 721–730.**
Кулиш А. М., Лосев В. В. Проектирование малошумящего усилителя с байпас-каналом X-диапазона частот с использованием библиотеки элементов технологического процесса 0,5 мкм GaAs-pHEMT. **Т. 30, № 1, с. 64–75.**
Минаков Е. И., Макарецкий Е. А., Лагутин С. А., Переверзев А. Л., Лялин К. С. Анализ излучающих систем АФАР Ka-диапазона. **Т. 30, № 6, с. 731–740.**
Смирнов В. И., Гавриков А. А., Нейчев В. Ф. Модуляционный метод измерения тепловых сопротивлений в силовых модулях на IGBT-транзисторах. **Т. 30, № 1, с. 40–50.**
Чаплыгин Ю. А., Красюков А. Ю., Крупкина Т. Ю., Балашов А. Г., Лосев В. В. Разработка отечественной САПР приборно-технологического моделирования для микроэлектронных технологий. **Т. 30, № 5, с. 607–617.**
Черемисинов Д. И., Черемисинова Л. Д. Методы структурного распознавания подсхем проходной транзисторной логики в КМОП-схемах. **Т. 30, № 1, с. 51–63.**
Чистяков А. Ю., Заплетина М. А. Быстрый алгоритм трассировки на ПЛИС с частичным разрывом трассировочных деревьев. **Т. 30, № 2, с. 162–171.**
Шевцов Н., Хисамов В. Т., Переверзев А. Л., Терновой Н. Э. Конвейеризация умножителя Уоллеса для однотактного процессора с архитектурой RISC-V. **Т. 30, № 3, с. 313–323.**

Электронное машиностроение

Переверзев А. Л., Петров В. Ф., Петров О. В., Симонов С. Б., Терентьев А. И. Системы автоматизированного управления технологическим оборудованием в электронном машиностроении. **Т. 30, № 5, с. 618–627.**

Микро- и наносистемная техника

Пилькевич А. В., Садков В. Д. Исследование теплового режима микрополосковых аттенюаторов с навесными пленочными поглощающими элементами. **Т. 30, № 3, с. 324–333.**

Интегральные радиоэлектронные устройства

Бурлака В. В., Гулаков С. В., Головин А. Ю. Программно-аппаратный комплекс для исследования MOSFET- и IGBT-транзисторов. **Т. 30, № 2, с. 185–193.**
Колесников Е. Б. Гармонические делители частоты на основе управляемого фазовращателя. **Т. 30, № 2, с. 172–184.**
Коршунов А. В., Щучкин Е. Ю. Снижение фазового шума в SiP-системах путем оптимизации динамического импеданса цепей питания. **Т. 30, № 4, с. 469–477.**

Переверзев А. Л., Лялин К. С., Цветков В. К., Мелёшин Ю. М., Козлов В. А., Кузьмин И. А. Методы построения спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов. **Т. 30, № 5, с. 628–640.**
Пилькевич А. В., Садков В. Д. Исследование влияния конструктивных параметров поглощающих элементов микрополосковых аттенюаторов на их частотные характеристики. **Т. 30, № 1, с. 76–86.**

Биомедицинская электроника

Гаврилов С. А., Герасименко А. Ю., Данилов А. А., Нездоровин О. В., Нездоровина В. Г., Нестеренко И. В., Переверзев А. Л., Пожар К. В., Рябкин Д. И., Селищев С. В. Нейроинтерфейсы живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг. **Т. 30, № 5, с. 641–656.**
Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Применение ШИМ-управления емкостью конденсаторов для стабилизации выходных характеристик системы индуктивного питания имплантатов. **Т. 30, № 1, с. 87–93.**
Лемонджава В. Н., Селищев С. В. Оценка повторяемости измерений при определении продолжительности нагрева донорской плазмы крови малых объемов. **Т. 30, № 4, с. 478–486.**
Новиков Д. В., Чумаченко Ю. В., Дубков С. В., Колмогоров В. С., Горелкин П. В., Ерофеев А. С., Пархоменко Ю. Н., Волкова Л. С., Железнякова А. В., Попенко В. Ф. Исследование процесса деградации ГКР-активных капилляров для комплексного использования в спектроскопии комбинационного рассеяния света и сканирующей ионпроводящей микроскопии. **Т. 30, № 6, с. 741–753.**
Чупраков Д. А., Пожар К. В., Струкова Э. И., Кирюточкин Н. С. Программный симулятор для оценки алгоритмов автоматизированной инсулинотерапии. **Т. 30, № 3, с. 334–343.**

Информационно-коммуникационные технологии

Аунг Чжо Мьо, Си Ту Тант Син, Портнов Е. М., Слюсарь М. В. Двухмагистральный интерфейс с комбинированной шиной данных для систем управления энергообеспечением. **Т. 30, № 2, с. 240–250.**
Бахтин А. А., Волков А. С., Муратчаев С. С. Разработка алгоритма межуровневого взаимодействия в децентрализованных самоорганизующихся сетях MANET. **Т. 30, № 5, с. 667–674.**
Болотин Ю. С. Разработка алгоритмов ранжирования с контекстной адаптацией для рекомендательных систем. **Т. 30, № 4, с. 508–519.**
Бордюжа В., Умняшкин С. В. Ансамблирование безэталонных мер качества изображений для повышения корреляции с экспертными оценками. **Т. 30, № 2, с. 229–239.**
Гаврилова Д. А. Повышение производительности отладочного сервера за счет оптимизации функции дешифрации команд. **Т. 30, № 1, с. 107–116.**
Ефанов Д. В., Елина Е. И. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел. I. Свойства кодов с суммированием. **Т. 30, № 3, с. 344–361.**
Ефанов Д. В., Елина Е. И. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел. II. Синтез тестеров кодов с суммированием. **Т. 30, № 4, с. 497–507.**
Ефанов Д. В., Елина Е. И. Коды с суммированием весовых коэффициентов разрядов из натурального ряда чисел. III. Эксперименты с тестовыми комбинационными схемами. **Т. 30, № 6, с. 774–787.**

Иванов И. П., Слюсарь В. В., Вишняков И. Э., Белова Н. С., Кузовчиков М. Е. Анализ алгоритма миксеров CoinJoin с выгрузкой данных в собственное распределенное хранилище. **Т. 30, № 2, с. 208–216.**
Конченков В. И., Мангушев А. В., Марков А. Е. Система компьютерного зрения для мобильного робота на базе платформы PYNQ. **Т. 30, № 2, с. 217–228.**
Портнов Е. М., Кокин В. В., Си Ту Тант Син, Аунг Чжо Мьо, Волков А. С. Спорадический способ обработки аварийных данных в распределенных энергосистемах. **Т. 30, № 3, с. 362–373.**
Слюсарь М. В., Ссали Р. Особенности учета неопределенностей при машинной обработке естественных языков. **Т. 30, № 6, с. 788–794.**
Смолин Р. В., Баландин И. А., Лаврентьев А. М., Андрющенков Е. Е. Способ двойного спектрального анализа и взвешенной обработки квазинепрерывных сигналов при отсутствии априорных сведений об их параметрах. **Т. 30, № 6, с. 763–773.**
Соколова Т. Ю., Кулагин Б. Ю. Виртуальное прототипирование интерактивных симуляторов сложного оборудования и высокотехнологичных процессов микроэлектроники. **Т. 30, № 5, с. 657–666.**
Сотников А. В., Шипатов А. В., Савченко Ю. В. Адаптивный алгоритм сопровождения объектов на видеоизображении. **Т. 30, № 1, с. 94–106.**
Таранов А. Ю. Алгоритм работы реконфигурируемого коммутатора на основе многоагентного взаимодействия. **Т. 30, № 2, с. 194–207.**
Шань Гуанбао, Ли Голян, Ван Юйсюань, Ци Пэйхан, Гончаренко В. И., Волков А. С., Муратчаев С. С. Применение и перспективы методов искусственного интеллекта в прогнозировании и оптимизации целостности сигнала в микросистемах. **Т. 30, № 6, с. 795–805.**
Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Царапкин С. Ф., Семенов М. Ю., Минаков Е. И., Портнов Е. М. Модель принятия решений в управлении производством микроэлектроники на основе марковских процессов и уравнений Колмогорова. **Т. 30, № 6, с. 754–762.**
Шевнина Ю. С., Хвостик П. М., Зайцев В. В., Винокуров А. А., Портнов Е. М. Прогностическое моделирование дефектов в изделиях микроэлектроники на основе нейросетевых ансамблей. **Т. 30, № 4, с. 487–496.**

Проблемы высшего образования

Зезин Д. А. Сравнение наборов инструментов для проектирования ИС с технологией 180 нм для применения в учебном процессе. **Т. 30, № 4, с. 520–526.**

Краткие сообщения

Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Котляров Е. Ю., Лосев В. В., Егоркин В. И. Экстракция параметров модели интегральной катушки индуктивности для технологического процесса GaN на кремнии. **Т. 30, № 6, с. 806–812.**

Юбилеи

Горбацевичу Александру Алексеевичу – 70 лет. **Т. 30, № 6, с. 813–814.**
Громову Дмитрию Геннадьевичу – 60 лет. **Т. 30, № 6, с. 816.**
Дубовому Николаю Дмитриевичу – 90 лет. **Т. 30, № 3, с. 378.**
Неволину Владимиру Николаевичу – 80 лет. **Т. 30, № 3, с. 377.**
Саурову Александру Николаевичу – 65 лет. **Т. 30, № 1, с. 117–118.**
Сигову Александру Сергеевичу – 80 лет. **Т. 30, № 3, с. 376.**
Тельцу Виталию Арсеньевичу – 70 лет. **Т. 30, № 6, с. 815.**

Конференции

32-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2025» с международным участием. **Т. 30, № 1, 4-я стр. обложки.**
Международная выставка-форум «Электроника России 2025» . **Т. 30, № 4, 2-я стр. обложки**
Об итогах 32-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2025» с международным участием. **Т. 30, № 3, с. 381–382.**
Об итогах Круглого стола «Большие языковые модели в преподавательской практике университета и колледжа с учетом психофизических факторов». **Т. 30, № 3, с. 379–380.**

МИЭТ – 60 лет! **Т. 30, № 5, с. 537–542.**

Памяти Неволина Владимира Кирилловича. **Т. 30, № 3, с. 374–375.**

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 7 августа 2025 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;**
- **элементы интегральной электроники;**
- **схемотехника и проектирование;**
- **микро- и наносистемная техника;**
- **электронное машиностроение;**
- **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 быть структурирована и содержать: введение; основную часть; заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: рубрика, в которой автор планирует опубликовать свою статью; 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 названиями рубрики, статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;

– на русском языке с названиями рубрики, 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, 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 по единым правилам для оригинального списка и References, основанным на элементах Ванкуверского и Гарвардского стандартов: фамилии авторов всегда пишутся перед заглавием; указываются по возможности все авторы (но не более 6-7); исключаются знаки / и //; не разделяются пробелами год выпуска, номера тома, выпуска, статьи и диапазон страниц;

– 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@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru