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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 27 | Vol. 27
№ 6 | No. 6
ноябрь – декабрь | November – December
2022

ПОДПИСКА 2023

Научно-технический журнал «Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА»

Периодичность журнала – 6 номеров в год

В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. На его страницах освещаются результаты научно-исследовательских работ, выполненных в вузах и НИИ, на промышленных предприятиях страны, методические аспекты преподавания с учетом современных требований и форм обучения, дается информация о научных конференциях. Формируются специальные выпуски по тематическому признаку.

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, дом 1, МИЭТ, комн. 7231

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 27, № 6, 2022
ноябрь – декабрь

Научно-технический журнал
Издается с 1996 г.
Выходит 6 раз в год

Учредитель и издатель: ***Национальный исследовательский университет «МИЭТ»***

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (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
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
Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
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
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377
Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)

© «Известия вузов. Электроника», 2022
© МИЭТ, 2022

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
Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада), ORCID: 0000-0003-0974-1262
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Орловский государственный университет им. А. С. Тургенева (Орёл, Россия), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
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)
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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

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

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

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

Подписано в печать 08.12.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 15,81 усл.печ.л., 13,712 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 8. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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 группам специальностей:

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств
2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

Включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.
Включен 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

Материалы электроники

Штерн М. Ю. Наноструктурированные термоэлектрические материалы для температур 200–1200 К, полученные искровым плазменным спеканием 695

Царик К. А., Некрасов Н. П., Неволин В. К., Бобринецкий И. И. Особенности формирования структур подвешенного графена над массивом микроразмерных пор 707

Технологические процессы и маршруты

Горностай-Польский В. С., Шевяков В. И. Исследование влияния плазменной обработки на свойства сформированных химическим осаждением из газовой фазы тонких пленок нитрида титана 715

Громов Д. Г., Ерицян Г. С., Кицюк Е. П., Савицкий А. И., Скорик С. Н., Дубков С. В., Гринаковский Е. Д., Булярский С. В., Дудин А. А., Волкова Л. С., Еганова Е. М., Трифонов А. Ю., Поляков М. В., Орлов А. П., Рудаков Г. А., Светухин В. В. Формирование планарных автоэмиссионных приборов на основе углеродных нанотрубок на сплаве Co-Nb-N-(O) 723

Схемотехника и проектирование

Котляров Е. Ю., Путря М. Г., Михайлов В. Ю., Зубов И. А., Васильев Е. С. Разработка прототипа микросхемы малошумящего усилителя для приемного тракта NB-IoT-системы 740

Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Достижение стабильной выходной мощности и эффективности усилителя мощности класса E при изменении собственной индуктивности частотного фильтра и сопротивления нагрузки 753

Джанполадов В. А., Гаврилов С. В. Прогнозирование мощности утечки на основе машинного обучения на этапе планировки физического проектирования ИС 763

Заплетина М. А. Решение задачи трассировки на ПЛИС с применением модели расширенного смешанного графа коммутационных ресурсов 774

Информационно-коммуникационные технологии

Гагарина Л. Г., Чирков А. В. Алгоритм обнаружения и распознавания болезней растений с использованием каскадных классификаторов 787

Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б., Сироткин В. Ю. Разработка алгоритма функционирования и особенности обучения когнитивного модуля искусственного интеллекта роботизированной системы тепличного растениеводства 795

Алимагадов К. А., Умняшкин С. В. Подавление белого шума на изображениях на основе винеровской фильтрации в области дискретного вейвлет-преобразования с применением нейросетевых технологий 807

Тематический указатель статей, опубликованных в 2022 году 819

К сведению авторов 823

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 27, No. 6, 2022
November – December
The scientifical and technical journal
Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Vladimir A. Bespalov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Alexandr V. Dushkin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Aleksandr A. Gorbatsevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Optolink LLC (Moscow, Russia)
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "NIIME" (Moscow, Russia)
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", 2022
© MIET, 2022

Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377
Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)
Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Andrey Y. Sazonov – PhD, Prof., University of Waterloo (Canada), ORCID: 0000-0003-0974-1262
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Orel State University named after I. S. Turgenev (Orel, Russia), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vyacheslav V. Svetukhin – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMC "Technological Centre" (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Head of editorial staff ***Doronina I. M.***
Chief editors ***Tikhonova A. V., Proskuryakova I. V.***
Make-up ***Ryzhkov S. Yu., Ryzhkov A. Yu.***

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

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

Signed to print 08.12.2022. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 15,81. Number of copies 130. Order no. 8. 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 groups of specialties:

2.2.2. Electronic component base of micro- and nanoelectronics, quantum devices
2.2.8. Material, product, substance and natural environment control and diagnostic techniques and devices
2.3.1. System analysis, information handling and processing
2.3.3. Process industries automation and control
2.3.5. Mathware and software for computer systems, complexes and networks

The journal is included into the Russian Science Citation Index on the Web of Science basis.

The journal is included 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

Electronics materials

Shtern M. Yu. Nanostructured thermoelectric materials for temperatures from 200 to 1200 K obtained by spark plasma sintering 695

Tsarik K. A., Nekrasov N. P., Nevolin V. K., Bobrinetskiy I. I. Features of the formation of suspended graphene structures over an array of microsized pores 707

Technological processes and routes

Gornostay-Polsky V. S., Shevyakov V. I. Investigation of the effect of plasma treatment on the properties of titanium nitride thin films formed by chemical vapor deposition 715

Gromov D. G., Eritsyan G. S., Kitsyuk E. P., Savitsky A. I., Skorik S. N., Dubkov S. V., Grinakovskiy E. D., Bulyarskiy S. V., Dudin A. A., Volkova L. S., Eganova E. M., Trifonov A. Yu., Poliakov M. V., Orlov A. P., Rudakov G. A., Svetukhin V. V. Formation of planar field-emission devices based on carbon nanotubes on Co-Nb-N-(O) alloy 723

Circuit engineering and design

Kotlyarov E. Yu., Putrya M. G., Mikhailov V. Yu., Zubov I. A., Vasilyev E. S. CMOS 0.18 μm low-noise amplifier concept design for NB-IoT receive path 740

Gurov K. O., Mindubaev E. A., Danilov A. A. Achieving stable output power and efficiency of a class E power amplifier while changing the self-inductance of the frequency filter and the load resistance 753

Janpoladov V. A., Gavrilov S. V. A machine learning-based leakage power prediction at floorplan stage of IC physical design 763

Zapletina M. A. Solving the FPGA routing problem using the model of an extended mixed routing graph 774

Information-communication technologies

Gagarina L. G., Chirkov A. V. Algorithm for plant disease detection and recognition using cascade classifiers 787

Kir'yanov A. A., Benevolenskiy S. B., Sirotkin V. Yu. Operation algorithm development and learning features of the cognitive module of artificial intelligence of a robotic system for greenhouse crop production 795

Alimagadov K. A., Umnyashkin S. V. White noise suppression based on Wiener filtering using neural networks technologies in the domain of discrete wavelet transform 807

Thematic index of articles published in 2022 819

Instructions for authors 823

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 537.322.1: 537.323
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-695-706

Наноструктурированные термоэлектрические материалы для температур 200–1200 К, полученные искровым плазменным спеканием

М. Ю. Штерн

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

m.y.shtern@org.miet.ru

Аннотация. Широкое применение термоэлектричества сдерживается низкой эффективностью термоэлементов, которая в основном определяется термоэлектрической добротностью термоэлектрических материалов (ТЭМ), используемых для их изготовления. В настоящее время основным направлением увеличения добротности является снижение фононной теплопроводности ТЭМ за счет их наноструктурирования. В работе исследован фазовый состав и тонкая структура нанодисперсных порошков ТЭМ с применением просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100. Элементный состав исходных компонентов для синтеза ТЭМ, измельченных порошков и объемных наноструктурированных ТЭМ (НТЭМ) определен с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6480LV. Разработаны способы и оптимизированы режимы получения нанодисперсных порошков и НТЭМ на основе Bi_2Te_3, Sb_2Te_3, PbTe, GeTe и SiGe с рабочими температурами в интервале 200–1200 К. Порошки получены с использованием шаровой планетарной мельницы. Средний размер областей когерентного рассеяния в порошках находится в пределах 12–47 нм. Объемные НТЭМ изготовлены компактированием порошков искровым плазменным спеканием. Показано, что области когерентного рассеяния в объемных образцах увеличиваются по сравнению со структурой порошков в среднем в 2-3 раза и составляют от 20 до 120 нм. В НТЭМ за счет снижения теплопроводности установлено увеличение параметра *ZT* от 10 до 20 % по сравнению с ТЭМ, получаемыми классическими методами и не имеющими наноструктуры.

Ключевые слова: термоэлектрические материалы, нанодисперсные порошки, термоэлектрическая эффективность, наноструктура, искровое плазменное спекание

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-19-00494).

© М. Ю. Штерн, 2022

Для цитирования: Штерн М. Ю. Наноструктурированные термоэлектрические материалы для температур 200–1200 К, полученные искровым плазменным спеканием // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 695–706. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2022-27-6-695-706

Original article

Nanostructured thermoelectric materials for temperatures from 200 to 1200 K obtained by spark plasma sintering

M. Yu. Shtern

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

m.y.shtern@org.miet.ru

Abstract. The wide application of thermoelectricity is constrained by the low efficiency of thermoelements, which is mainly determined by the thermoelectric figure of merit of thermoelectric materials (TEMs) used for their manufacture. At present, the main direction of figure of merit increase is to reduce the phonon thermal conductivity of TEMs using their nanostructuring. In this work, the phase composition and fine structure of TEM nanopowders are studied with the application of a JEM-2100 transmission electron microscope. The elemental composition of the initial components for the synthesis of TEMs, ground powders, and bulk nanostructured TEMs (NTEMs) was determined via use of a JSM-6480LV scanning electron microscope. Methods have been developed and modes have been optimized of obtaining nanodispersed powders and NTEM based on Bi_2Te_3, Sb_2Te_3, PbTe, GeTe and SiGe with operating temperatures in the range of 200–1200 K. Powders were produced using a planetary ball mill. The average size of the coherent scattering regions in the powders ranged from 12 to 47 nm. Bulk NTEMs were produced by powder compaction by spark plasma sintering. It was demonstrated that coherent scattering regions in bulk samples increase in comparison with the structure of powders by an average 2-3 times and range from 20 to 120 nm. In NTEM, due to a decrease in thermal conductivity, an increase in ZT from 10 to 20 % has been established in comparison with TEM obtained by classical methods and not nanostructured.

Keywords: thermoelectric materials, nanopowders, thermoelectric efficiency, nanostructure, spark plasma sintering

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00494).

For citation: Shtern M. Yu. Nanostructured thermoelectric materials for temperatures from 200 to 1200 K obtained by spark plasma sintering. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 695–706. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2022-27-6-695-706

Введение. Термоэлектрические устройства (ТЭУ), работающие на основе эффекта Пельтье, успешно используются для охлаждения и термостатирования электронной, оптической и лазерной техники, в технологическом и метрологическом оборудовании, а также перспективны в качестве тепловых насосов для отопления и кондиционирования помещений [1–3]. Термоэлектрические генераторы (ТЭГ), применяемые для прямо-

го преобразования тепловой энергии в электрическую, работающие на основе эффекта Зеебека, находят применение, когда необходимы надежные источники электроэнергии с большой удельной мощностью, длительным сроком эксплуатации, не требующие обслуживания. Для работы ТЭГ могут использоваться самые разнообразные источники тепла [1, 4]. Однако широкое применение термоэлектричества ограничено ввиду низкой эффективности термоэлементов, которые являются основой конструкции любого ТЭУ. Эффективность термоэлементов в основном определяется термоэлектрической добротностью Z полупроводниковых термоэлектрических материалов (ТЭМ), используемых для их изготовления. Добротность рассчитывается следующим образом: $Z=s^2\sigma/\kappa$, где s – термоЭДС; σ – электропроводность; κ – теплопроводность ТЭМ. Для характеристики эффективности ТЭМ при определенной температуре используется безразмерный параметр ZT (где T – термодинамическая температура).

Работы по созданию эффективных ТЭМ активно ведутся [1, 5–7]. Существуют два способа повышения термоэлектрической добротности Z: увеличение фактора мощности $s^2\sigma$ и снижение теплопроводности κ ТЭМ. Однако значительно увеличить $s^2\sigma$ по ряду причин пока не удается. В последние два десятилетия возросла активность исследований с целью снижения теплопроводности ТЭМ. Теплопроводность ТЭМ определяется фононной $\kappa_ф$, электронной $\kappa_э$ и биполярной $\kappa_{бп}$ составляющими: $\kappa = \kappa_ф + \kappa_э + \kappa_{бп}$. В области рабочих температур термоэлементов биполярная составляющая отсутствует, поэтому основная задача – снижение фононной составляющей [8]. С этой целью перспективно создание наноструктурированных ТЭМ (НТЭМ) [9–12], для получения которых ТЭМ, изготовленные в результате прямого синтеза, подвергают измельчению до размеров частиц, не превышающих, как правило, 100 нм. Затем полученный нанодисперсный порошок компактируют для получения объемных образцов методами горячего прессования или искрового плазменного спекания. Размеры зерен в полученных объемных ТЭМ коррелируют с размером частиц порошка, из которого они компактируются. Увеличение термоэлектрической добротности в НТЭМ происходит вследствие снижения фононной теплопроводности и, соответственно, общей теплопроводности. Фононная теплопроводность снижается за счет интенсивного рассеяния фононов со средней длиной свободного пробега, соизмеримой с размерами зерен в НТЭМ. На долю таких фононов приходится до 40 % переносимой тепловой энергии [13].

Термоэлемент представляет собой термопару, состоящую из ветвей, соединенных последовательно и изготавливаемых из ТЭМ n- и p-типа проводимости. ТЭМ – это в большинстве случаев легированные твердые растворы: на основе Bi_2Te_3 (n-типа) и Sb_2Te_3 (p-типа), также на основе Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3, но с другим соотношением компонентов и легированием для температур до 600 К (среднетемпературные ТЭМ), на основе PbTe (n-типа) и GeTe (p-типа) для температур до 900 К (среднетемпературные ТЭМ). Среднетемпературный интервал составляет 450–900 К. При температурах до 1200 К используются высокотемпературные материалы на основе SiGe (n- и p-типа).

Цель настоящей работы – создание эффективных НТЭМ с рабочими температурами от 200 до 1200 К.

Методы исследования. Дисперсность порошка и структуры объемных НТЭМ определяли с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM 2100 высокого разрешения. Измерения проводили при ускоряющем напряжении 200 кВ. При рассмотрении механизмов рассеяния фононов в твердом кристаллическом теле важно отметить, что границами рассеяния фононов могут быть не только границы зерен, но и другие структурные элементы материалов (структурные неоднородности). В связи с этим целесообразно использовать термин «область когерентного рассеяния» (ОКР) –

область вещества, рассеивающая падающее излучение когерентно. В рентгеновской дифракции ОКР – характерная область кристалла, рассеивающая рентгеновское излучение когерентно и независимо от других таких же областей [14]. ОКР с размерами порядка десятков нанометров являются основными объектами рассеяния фононов со средней длиной свободного пробега. Экспериментальным косвенным методом определения среднего размера ОКР является дифракционный метод, при котором размеры ОКР определяются по уширению дифракционных отражений (рентгеновская или электронная дифракция) с помощью ПЭМ.

Элементный состав исходных компонентов для синтеза ТЭМ, порошков и полученных после искрового плазменного спекания образцов объемных НТЭМ определяли на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-6480LV. Исследование с помощью ПЭМ и РЭМ проводили в ЦКП «Материаловедение и металлургия» НИТУ «МИСиС» (г. Москва). Для определения электропроводности, термоЭДС и теплопроводности ТЭМ использовали методику, описанную в [15]. По полученным данным рассчитывали термоэлектрическую добротность Z и параметр ZT. Плотность ТЭМ определяли методом гидростатического взвешивания.

Разработка способов получения нанодисперсных порошков и НТЭМ методом искрового плазменного спекания. Для исследований изготовлены следующие ТЭМ. Низкотемпературные ТЭМ с рабочими температурами 200–450 К: $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ (легирован 0,11 вес. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$) n-типа и $Bi_{0,55}Sb_{1,45}Te_3$ (легирован 3 вес. % $Te_{изб}$ и 0,09 вес. % Pb) p-типа. Среднетемпературные ТЭМ – до 600 К: $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ (легирован 0,4 вес. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$) n-типа и $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_{2,92}Se_{0,08}$ (легирован 3 вес. % $Te_{изб}$ и 0,3 вес. % Pb и 1,7 вес. % Se) p-типа. Среднетемпературные ТЭМ – до 900 К: PbTe (легирован 0,2 вес. % PbI_2 и 0,3 вес. % Ni) n-типа и $Ge_{0,96}Bi_{0,04}Te$ p-типа. Высокотемпературные ТЭМ – до 1200 К: $Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (легирован 2,2 вес. % P) n-типа и $Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (легирован 0,78 вес. % B) p-типа. При легировании в ТЭМ на основе BiSbTe вводится избыточный по отношению к стехиометрическому составу теллур $Te_{изб}$.

Синтез ТЭМ проводили методом прямого сплавления взятых в стехиометрическом соотношении компонентов. Для всех компонентов осуществляли входной контроль состава на РЭМ. Навески исходных компонентов, включая легирующие добавки (кроме ТЭМ на основе SiGe), загружали в кварцевые ампулы с нанесенным внутри них защитным слоем пиролитического углерода. Ампулы вакуумировали до остаточного давления $1 \cdot 10^{-4}$ торр, заполняли инертным газом (аргоном) и проводили отпайку. Затем ампулы загружали в муфельную качающуюся печь, в которой для гомогенизации расплава его перемешивали при непрерывном качании. Синтезировали ТЭМ при следующих температурах и времени: на основе Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 – 1050 К, 120 мин; на основе PbTe – 1350 К, 120 мин; на основе GeTe – 1250 К, 180 мин. После синтеза ампулы с ТЭМ закаливали со скоростью охлаждения порядка 500 К/мин.

Синтез ТЭМ на основе SiGe проводили методом индукционной плавки в вакуумной литьевой машине Indutherm VTC 200 V следующим образом. Исходные материалы Si и Ge, а также легирующие добавки загружали в керамический тигель с внутренним покрытием из графита, который устанавливали в индуктор литьевой машины. Далее по заданной программе откачивали объем рабочей камеры до давления 75 торр, наполняли ее аргоном и проводили индукционный нагрев тигля с SiGe до 1700 К. После расплавления всех исходных компонентов их перемешивали за счет изменения интенсивности магнитного поля в течение 5 мин и выдерживали расплав при температуре 1700 К еще 5 мин. Далее расплав переливали в изложницу, где проводили его естественное охлаждение.

Разработанный способ получения нанодисперсных порошков включает в себя следующие операции. Синтезированный ТЭМ измельчали с помощью дробилки ЩД-6 и мельницы ножевого типа IKA A11 в перчаточном боксе Plas-Labs в защитной атмосфере из аргоно-водородной смеси (Ar 97 % и H_2 3 %). Измельчение проводили до размера частиц 250 мкм. Полученный порошок помещали в стаканы из нержавеющей стали с металлическими размольными шарами диаметром 5 мм и дополнительно измельчали с помощью планетарной шаровой мельницы Retsch PM400 MA до получения нанодисперсного порошка с преобладанием частиц размером 10–100 нм. Соотношение массы шаров и ТЭМ составляло 10:1, скорость вращения планетарного диска шаровой мельницы – 400 об/мин.

Установлено, что при получении порошков с дисперсностью порядка десятков нанометров в процессе помола происходит их объединение в агломераты больших размеров – от сотен нанометров до микрон. Наблюдается также эффект наклепа, увеличивающий размеры частиц. При этом интенсивное измельчение происходит в первые 40 мин, а минимальные размеры порошков достигаются за 50–60 мин. Дальнейшее увеличение времени помола приводит к повышению размера частиц, что связано с интенсификацией процесса агломерирования порошка и явлением наклепа. Размер зерен в объемных образцах НТЭМ после искрового плазменного спекания коррелирует с дисперсностью исходного порошка. Поэтому для интенсивного рассеяния фононов целесообразно получать порошок с минимальной дисперсностью. Однако в процессе спекания при повышенных температурах, если преобладают порошки с размерами частиц менее 10 нм, за счет их высокой удельной поверхности повышается вероятность рекристаллизации с образованием зерен большого размера.

Объемные образцы НТЭМ из нанодисперсных порошков получали методом искрового плазменного спекания на установке SPS 511S. Через порошок, загруженный в графитовую пресс-форму, пропускали постоянный электрический ток большой мощности (до 1200 А) в импульсном режиме длительностью до 12 мс с интервалом 2 мс. При этом на порошок оказывали регулируемое давление (до 100 МПа). Температуру процесса регулировали автоматически за счет мощности пропускаемого тока. Искровое плазменное спекание может проводиться в вакууме или в среде инертного газа. При пропускании электрического тока большой мощности через порошок выделяется тепло Джоуля и нагревается объем порошка. В местах контакта частиц порошка возникает искровой разряд и образуется плазма (рис. 1) с локальным повышением температуры, приводящим к подплавлению поверхности частиц порошка в местах контакта.

Повышение температуры в совокупности с приложенным давлением инициирует процесс спекания порошка. Однако при высоких температурах и времени спекания нанозерна, образованные исходными порошками, в процессе прессования начинают быстро расти вследствие собирательной рекристаллизации, что приводит к нарушению тонкой нанокристаллической структуры. Локальное повышение температуры с образованием плазмы с помощью метода искрового плазменного спекания позволяет проводить спекание порошков при более низких температурах по сравнению с альтернативным методом горячего прессования, а также при меньших давлении и времени нагрева. Таким образом, использование искрового плазменного спекания по сравнению с горячим прессованием позволяет уменьшать разрастание зерен, приводящее к снижению термоэлектрической добротности Z НТЭМ. Преимущество указанного метода еще и в том, что достигается плотность материала 98–99 % от теоретически возможной.

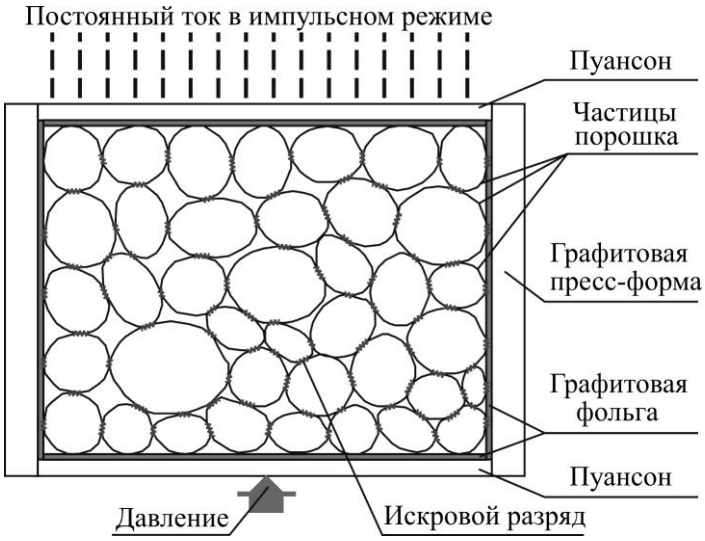


Рис. 1. Схема процесса искрового плазменного спекания порошков
Fig. 1. Diagram of the process of spark plasma sintering of powders

В процессе получения НТЭМ из нанодисперсных порошков оптимизированы режимы искрового плазменного спекания. Перед загрузкой ТЭМ в установку SPS 511S из порошков Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 методом холодного прессования получали брикеты на прессе ПГЛ-20. Для других ТЭМ эту операцию не проводили. Брикетирование порошков Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 необходимо для устранения образования пор в объемных наноструктурированных образцах. Для ТЭМ на основе PbTe, GeTe и SiGe этого явления не наблюдали. Порошок ТЭМ на основе PbTe, GeTe и SiGe или брикеты ТЭМ на основе Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 помещали в графитовую пресс-форму и закрывали пуансонами из графита. Операцию проводили в боксе Plas-Labs. Собранную пресс-форму размещали в установке SPS 511S. Прессование ТЭМ проводили с помощью гидравлического пресса установки под действием давления на порошок. Режимы спекания регулировали автоматически по заданной программе.

Очевидно, что чем ниже температура и время спекания, тем меньше вероятность собирательной рекристаллизации. Однако при низкой температуре и недостаточном времени возможно неполное спекание частиц порошка. В этом случае получается неоднородный, многофазовый ТЭМ. Поэтому в процессе искрового плазменного спекания температура и время спекания оптимизируются для каждого ТЭМ отдельно с учетом данных исследования структуры, фазового анализа и также термоэлектрической добротности Z НТЭМ: на основе Bi_2Te_3, Sb_2Te_3, PbTe – 723 К, 5 мин; GeTe – 773 К, 5 мин; SiGe – 1373 К, 10 мин.

Давление в процессе искрового плазменного спекания определяет плотность полученного объемного НТЭМ. Установлено, что 98%-ная плотность от теоретически возможной достигается при давлении 50 МПа для ТЭМ на основе Bi_2Te_3, Sb_2Te_3, GeTe, SiGe, 80 МПа для ТЭМ на основе PbTe. Установлено также, что изменение стехиометрического состава и легирование ТЭМ примесями с целью оптимизации концентрации носителей тока для получения максимальных значений термоэлектрической добротности Z не влияло на режимы получения порошка и режимы спекания НТЭМ. Методом искрового плазменного спекания получали образцы НТЭМ диаметром 20 мм и высотой от 3 до 10 мм.

Исследование ТЭМ. Размеры ОКР в ТЭМ определяли с помощью ПЭМ дифракционным методом по уширению дифракционных отражений. Метод позволяет оценить размер частиц (зерен, ОКР), усредненный по объему исследуемого вещества. На рис. 2 представлена дифрактограмма порошка $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ после помола в течение 50 мин. Показан набор дифракционных отражений (дифракционных максимумов), каждое из которых характеризуется определенным межплоскостным расстоянием и интенсивностью. Дифракционные максимумы значительно уширены, что говорит о малом размере ОКР и наличии микродеформаций. Средний размер ОКР, оцененный по уширению пиков на дифрактограмме, составляет 28±2 нм. На рис. 3 приведены ПЭМ-изображения порошка $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ после помола в течение 50 мин.

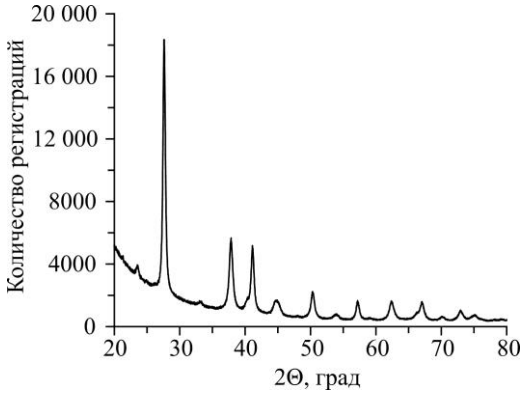


Рис. 2. Дифрактограмма порошка $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ после помола в течение 50 мин
Fig. 2. Diffractogram from powder $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ after grinding for 50 min

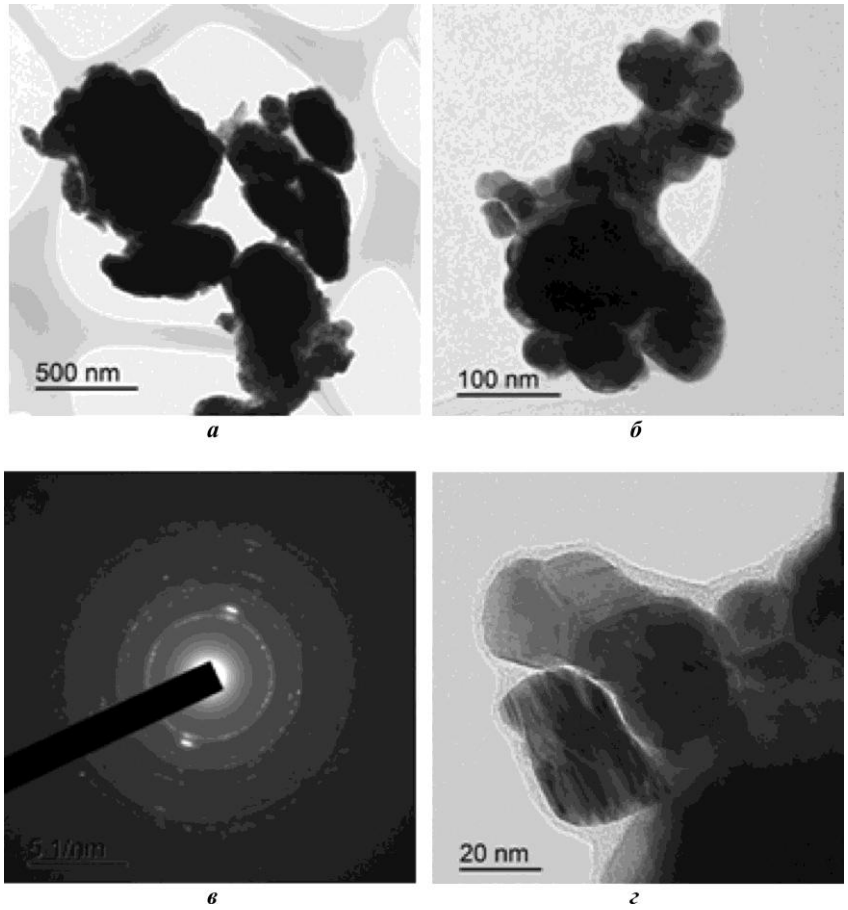


Рис. 3. ПЭМ-изображения агломератов (*а*, *б*), кольцевой электронограммы (*в*) и отдельных частиц (*г*) порошка $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ после помола в течение 50 мин
Fig. 3. Images based on transmission electron microscope of agglomerates and individual powder particles $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ after grinding for 50 min: *a*, *b* – agglomerates; *c* – ring electronogram; *d* – individual particles

Порошок $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ после помола представляет собой агломераты (рис. 3, *а*, *б*), состоящие из сросшихся или слипшихся мелкодисперсных частиц. Размеры агломератов изменяются от 100 до 700 нм. Расположение рефлексов на кольцевой электронограмме (рис. 3, *в*) соответствует фазе $Bi_2Te_{2-x}Se_x$. На рис. 3, *г* видны отдельные частицы в агломерате, размеры которых изменяются от 20 до 60 нм. При изготовлении порошков всех ТЭМ фазовый состав и параметры кристаллической структуры при разном времени помола не различались, выделения вторых фаз не происходило. Данные о тонкой структуре, составе и параметрах кристаллической решетки порошков ТЭМ приведены в таблице.

Результаты исследования наноструктурированных ТЭМ
Results of the study of nanostructured thermoelectric materials

Состав ТЭМ	Средний размер ОКР, нм	Периоды решетки, Å	Максимальное значение *ZT*	Температура при максимальном значении *ZT*, К
$Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ (0,11 вес. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$)	28 ± 2	a = 4,373 ± 0,001 c = 30,389 ± 0,001	1,21	340
$Bi_{0,55}Sb_{1,45}Te_3$ (3 вес. % $Te_{изб}$ и 0,09 вес. % Pb)	30 ± 2	a = 4,297 ± 0,001 c = 30,474 ± 0,001	1,23	350
$Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ (0,4 вес. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$)	31 ± 2	a = 4,373 ± 0,001 c = 30,392 ± 0,001	1,24	465
$Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_{2,92}Se_{0,0}$ (3 вес. % $Te_{изб}$; 0,3 вес. % Pb; 1,7 вес. % Se)	30 ± 2	a = 4,289 ± 0,001 c = 30,453 ± 0,001	1,29	475
PbTe (0,2 вес. % PbI_2 + + 0,3 вес. % Ni)	47 ± 5	a = 6,461 ± 0,001	1,50	875
$Ge_{0,96}Bi_{0,04}Te$	19 ± 2	a = 4,212 ± 0,001 c = 10,642 ± 0,001	1,55	840
$Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (2,2 вес. % P)	14 ± 2	a = 5,458 ± 0,001	1,22	1100
$Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (0,78 вес. % B)	12 ± 2	a = 5,452 ± 0,001	1,20	1120

После искрового плазменного спекания проводили исследования фазового состава и структуры объемных образцов ТЭМ. Размеры структурных элементов образцов изучали на сколах во вторичных электронах. Сколы готовили при комнатной температуре. В соответствии со структурой твердых растворов ТЭМ скалывание происходило преимущественно по плоскостям спайности. Отражение электронов от разных кристаллических поверхностей с разным наклоном поверхностей скола зерен позволяет судить о зеренной структуре материала при формировании изображения в отраженных электронах.

На рис. 4 приведены ПЭМ-изображения поверхности скола наноструктурированных образцов $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$, полученных из порошков при разном времени помола. Количественную оценку размеров структурных элементов скола проводили методом секущих. Следует отметить, что во всех исследованных образцах НТЭМ пор и трещин не наблюдалось. Наиболее мелкодисперсная структура отмечена у образца, полученного из порошка после 50 мин помола.

По результатам исследований дифрактограмм образцов НТЭМ установлено, что размеры структурных элементов в объемных образцах коррелируют с размерами нанодисперсных порошков, из которых они спекаются. При этом размеры ОКР в объемных образцах увеличиваются по сравнению со структурой порошков в среднем в 2-3 раза и составляют от 20 до 120 нм. В НТЭМ фазовый состав не изменился по сравнению с фазовым составом порошков. Все исследованные образцы однофазные.

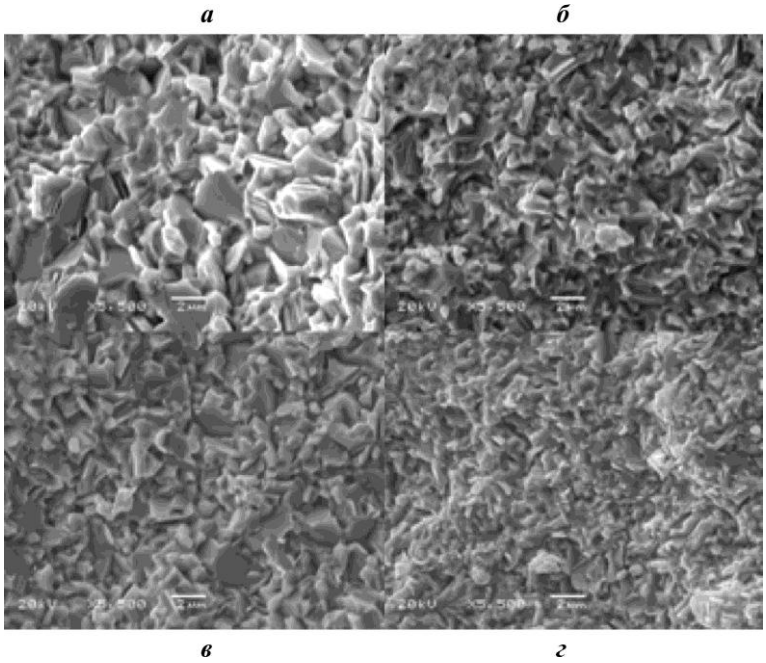


Рис. 4. ПЭМ-изображения поверхности скола во вторичных электронах образцов $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ после искрового плазменного спекания, полученных из порошков после помола в течение 20 мин (*а*); 30 мин (*б*); 40 мин (*в*); 50 мин (*г*)

Fig. 4. Images based on transmission electron microscope of the chip surface in secondary electrons of $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ samples after SPS obtained from powders after different grinding times: *a* – 20 min; *b* – 30 min; *c* – 40 min; *d* – 50 min

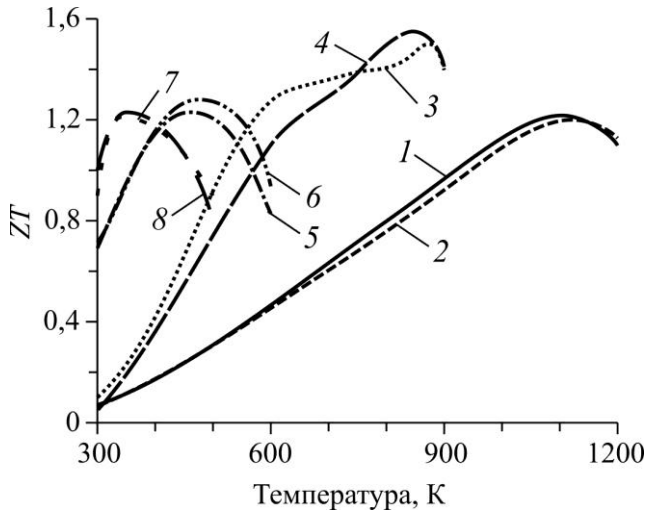


Рис. 5. Температурная зависимость параметра *ZT* НТЭМ: *1* – $Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (2,2 вес. % P); *2* – $Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (0,78 вес. % B); *3* – PbTe (0,2 вес. % PbI_2 и 0,3 вес. % Ni); *4* – $Ge_{0,96}Bi_{0,04}Te$; *5* – $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ (0,4 вес. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$); *6* – $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_{2,92}Se_{0,08}$ (3 вес. % $Te_{изб}$ и 0,3 вес. % Pb, 1,7 вес. % Se); *7* – $Bi_2Te_{2,8}5Se_{0,15}$ (0,11 вес. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$); *8* – $Bi_{0,55}Sb_{1,45}Te_3$ (3 вес. % $Te_{изб}$ и 0,09 вес. % Pb)

Fig. 5. Temperature dependence of the *ZT* parameter NTEM: *1* – $Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (2,2 wt. % P); *2* – $Si_{0,8}Ge_{0,2}$ (0,78 wt. % B); *3* – PbTe (0,2 wt. % PbI_2, 0,3 wt. % Ni); *4* – $Ge_{0,96}Bi_{0,04}Te$; *5* – $Bi_2Te_{2,85}Se_{0,15}$ (0,4 wt. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$); *6* – $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_{2,92}Se_{0,08}$ (3 wt. % $Te_{изб}$, 0,3 wt. % Pb, 1,7 wt. % Se); *7* – $Bi_2Te_{2,8}5Se_{0,15}$ (0,11 wt. % $Bi_{11}Se_{12}Cl_9$); *8* – $Bi_{0,55}Sb_{1,45}Te_3$ (3 wt. % $Te_{изб}$, 0,09 wt. % Pb)

В результате исследования тепло- и электрофизических параметров НТЭМ установлено снижение теплопроводности, что приводит к увеличению термоэлектрической добротности и, соответственно, к эффективности НТЭМ. Температурная зависимость параметра ZT НТЭМ представлена на рис. 5. Увеличение термоэлектрической добротности Z и, следовательно, параметра ZT НТЭМ по отношению к ТЭМ, получаемым классическими методами [1, 6, 11] и не имеющим наноструктуры, составляет 10–20 %. Максимальные значения параметра ZT и температура, при которой определены эти значения, представлены в таблице.

Заключение. Проведенные исследования показали, что создание эффективных НТЭМ с широким интервалом рабочих температур (200–1200 К) позволяет существенно расширить область применения термоэлементов и, соответственно, ТЭУ. Отметим, что КПД ТЭГ наряду с использованием эффективных ТЭМ может быть увеличен за счет повышения разности температур ΔT между горячими и холодными спаями термоэлемента и, соответственно, расширения интервала рабочих температур ТЭГ. Конструктивно реализовать это возможно, изготовив многосекционные термоэлементы. Каждая секция работает в определенном интервале температур и изготавливается из ТЭМ, имеющего максимальную термоэлектрическую добротность Z при указанных температурах [11].

Результаты настоящей работы имеют принципиальное значение для создания эффективных многосекционных термоэлементов и ТЭГ на их основе.

Литература

1. Current state of thermoelectric material science and the search for new effective materials / ***A. A. Sherchenkov, Yu. I. Shtern, R. E. Mironov et al.*** // Nanotechnol. Russia. 2015. Vol. 10. Iss. 11-12. P. 827–840. https://doi.org/10.1134/S1995078015060117

2. ***Cheon S.-Y., Lim H., Jeong J.-W.*** Applicability of thermoelectric heat pump in a dedicated outdoor air system // Energy. 2019. Vol. 173. P. 244–262. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.012

3. ***Goldsmid H. J.*** Introduction to thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer, 2016. XVIII, 278 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7

4. ***Champier D.*** Thermoelectric generators: A review of applications // Energy Convers. and Management. 2017. Vol. 140. P. 167–181. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070

5. ***Yang L., Chen Z.-G., Dargusch M. S., Zou J.*** High performance thermoelectric materials: progress and their applications // Adv. Energy Mater. 2017. Vol. 8. Iss. 6. Art. No. 1701797. https://doi.org/10.1002/aenm.201701797

6. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements / ***M. Shtern, M. Rogachev, Yu. Shtern et al.*** // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 877. Art. No. 160328. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328

7. ***Shi X., Chen L., Uher C.*** Recent advances in high-performance bulk thermoelectric materials // International Materials Reviews. 2016. Vol. 61. Iss. 6. P. 379–415. https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1183075

8. ***Rogachev M. S., Shtern M. Yu., Shtern Yu. I.*** Mechanisms of heat transfer in thermoelectric materials // Nanotechnol. Russia. 2021. Vol. 16. Iss. 3. P. 308–315. https://doi.org/10.1134/S2635167621030162

9. Mechanically robust BiSbTe alloys with superior thermoelectric performance: A case study of stable hierarchical nanostructured thermoelectric materials / ***Y. Zheng, Q. Zhang, X. Su et al.*** // Adv. Energy Mater. 2015. Vol. 5. Iss. 5. Art. No. 1401391. https://doi.org/10.1002/aenm.201401391

10. Enhanced thermoelectric performance of $Bi_{0.46}Sb_{1.54}Te_3$ nanostructured with CdTe / ***Q. Tao, R. Deng, J. Li et al.*** // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2020. Vol. 12. Iss. 23. P. 26330–26341. https://doi.org/10.1021/acsami.0c03225

11. ***Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I., Shtern M. Yu., Rogachev M. S.*** Prospects of creating efficient thermoelectric materials based on the achievements of nanotechnology // Nanotechnol. Russia. 2016. Vol. 11. Iss. 7-8. P. 387–400. https://doi.org/10.1134/S1995078016040157

12. Thermoelectric properties and thermal stability of nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe, GeTe, and SiGe / ***M. Yu. Shtern, A. A. Sherchenkov, Yu. I. Shtern et al.*** // Nanotechnol. Russia. 2021. Vol. 16. Iss. 3. P. 363–372. https://doi.org/10.1134/S2635167621030174

13. ***Aswal D. K., Basu R., Singh A.*** Key issues in development of thermoelectric power generators: High figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 114. P. 50–67. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.065

14. ***Гусев А. И.*** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2009. 416 с.

15. ***Shtern M. Yu.*** Development and application of a research technique to study thermal and electrophysical parameters of thermoelectric materials at temperatures up to 1200 K // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2019. P. 1920–1926. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657108

Статья поступила в редакцию 23.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 19.09.2022 г.;
принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторе

Штерн Максим Юрьевич – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), m.y.shtern@gmail.com

References

1. Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I., Mironov R. E., Shtern M. Yu., Rogachev M. S. Current state of thermoelectric material science and the search for new effective materials. *Nanotechnol. Russia,* 2015, vol. 10, iss. 11-12, pp. 827–840. https://doi.org/10.1134/S1995078015060117

2. Cheon S.-Y., Lim H., Jeong J.-W. Applicability of thermoelectric heat pump in a dedicated outdoor air system. *Energy,* 2019, vol. 173, pp. 244–262. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.012

3. Goldsmid H. J. *Introduction to thermoelectricity.* 2nd ed. Berlin, Heidelberg, Springer, 2016. xviii, 278 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7

4. Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Convers. and Management,* 2017, vol. 140, pp. 167–181. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070

5. Yang L., Chen Z.-G., Dargusch M. S., Zou J. High performance thermoelectric materials: progress and their applications. *Adv. Energy Mater.,* 2018, vol. 8, iss. 6, art. no. 1701797. https://doi.org/10.1002/aenm.201701797

6. Shtern M., Rogachev M., Shtern Yu., Sherchenkov A., Babich A., Korchagin E., Nikulin D. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements. *Journal of Alloys and Compounds,* 2021, vol. 877, art. no. 160328. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328

7. Shi X., Chen L., Uher C. Recent advances in high-performance bulk thermoelectric materials. *International Materials Reviews,* 2016, vol. 61, iss. 6, pp. 379–415. https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1183075

8. Rogachev M. S., Shtern M. Yu., Shtern Yu. I. Mechanisms of heat transfer in thermoelectric materials. *Nanotechnol. Russia,* 2021, vol. 16, iss. 3, pp. 308–315. https://doi.org/10.1134/S2635167621030162

9. Zheng Y., Zhang Q., Su X., Xie H., Shu Sh., Chen T., Tan G., Yan Y., Tang X., Uher C., Snyder G. J. Mechanically robust BiSbTe alloys with superior thermoelectric performance: A case study of stable hierarchical nanostructured thermoelectric materials. *Adv. Energy Mater.,* 2015, vol. 5, iss. 5, art. no. 1401391. https://doi.org/10.1002/aenm.201401391

10. Tao Q., Deng R., Li J., Yan Y., Su X., Poudeu P. F. P., Tang X. Enhanced thermoelectric performance of $Bi_{0.46}Sb_{1.54}Te_3$ nanostructured with CdTe. *ACS Appl. Mater. Interfaces,* 2020, vol. 12, iss. 23, pp. 26330–26341. https://doi.org/10.1021/acsami.0c03225

11. Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I., Shtern M. Yu., Rogachev M. S. Prospects of creating efficient thermoelectric materials based on the achievements of nanotechnology. *Nanotechnol. Russia,* 2016, vol. 11, iss. 7-8, pp. 387–400. https://doi.org/10.1134/S1995078016040157

12. Shtern M. Yu., Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I., Rogachev M. S., Babich A. V. Thermoelectric properties and thermal stability of nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe, GeTe, and SiGe. *Nanotechnol. Russia,* 2021, vol. 16, iss. 3, pp. 363–372. https://doi.org/10.1134/S2635167621030174

13. Aswal D. K., Basu R., Singh A. Key issues in development of thermoelectric power generators: High figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects. *Energy Conversion and Management,* 2016, vol. 114, pp. 50–67. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.065

14. Gusev A. I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies.* 2nd ed., rev. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 416 p. (In Russian).

15. Shtern M. Yu. Development and application of a research technique to study thermal and electrophysical parameters of thermoelectric materials at temperatures up to 1200 K. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).* St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2019, pp. 1920–1926. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657108

The article was submitted 23.08.2022; approved after reviewing 19.09.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the author

Maxim Yu. Shtern – 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), m.y.shtern@gmail.com

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

Научная статья
УДК 537.534.35:621.382.032.27
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-707-714

Особенности формирования структур подвешенного графена над массивом микроразмерных пор

К. А. Царик, Н. П. Некрасов, В. К. Неволин, И. И. Бобринецкий

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

tsarik_kostya@mail.ru

Аннотация. Структуры на основе подвешенного графена – перспективные элементы для задач электроники, фотоники и сенсорики вследствие возможности устранения ловушечных состояний в подложке, повышения быстродействия и чувствительности графенового слоя. Также актуально развитие методик внедрения углеродных наноструктур в кремниевую технологию создания устройств микро- и наноэлектроники. В работе представлены особенности формирования кремниевой мембраны и сквозных пор в ней, а также осаждения графена на кремниевые мембраны. Получены спектры комбинационного рассеяния света подвешенного графена, показывающие сдвиги G-пика на 4,5 $см^{-1}$ и 2D-пика на 7,5 $см^{-1}$ относительно пиков графена, находящегося на кремнии. С помощью кривых подвода и отвода зонда атомно-силового микроскопа исследован возможный прогиб графена в сквозное отверстие, показывающий расстояния, на которых расположены притягивающие и отталкивающие силы в системе зонд – подвешенный графен. Установлено, что ввиду значительного провисания графена на 1 мкм при диаметре поры 5 мкм фокусировка лазера затруднена. Это в первую очередь влияет на использование структур подвешенного графена в качестве основы для газового или жидкостного сенсора различных органических соединений, а также для транзисторов.

Ключевые слова: кремниевая микропора, графен, плазмохимическое травление, ионная литография, ультратонкий электронно-чувствительный резист

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-19-00401).

Для цитирования: Царик К. А., Некрасов Н. П., Неволин В. К., Бобринецкий И. И. Особенности формирования структур подвешенного графена над массивом микроразмерных пор // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 707–714. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-707-714

© К. А. Царик, Н. П. Некрасов, В. К. Неволин, И. И. Бобринецкий, 2022

Original article

Features of the formation of suspended graphene structures over an array of microsized pores

K. A. Tsarik, N. P. Nekrasov, V. K. Nevolin, I. I. Bobrinetskiy

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

tsarik_kostya@mail.ru

Abstract. Structures based on suspended graphene are promising elements for problems in photonics and sensory electronics due to the elimination of trap states in the substrate and an increase in the speed and sensitivity of the graphene layer. The development of carbon nanostructure based groups of techniques' incorporation into silicon based technologies of micro- and nanoelectronic devices creation is also of relevance. In this work, the features of the technique for the formation of a silicon membrane and pores in it, as well as the deposition of graphene on silicon membranes, are presented. The Raman spectra of suspended graphene showing a shift of the G-peak by 4.5 cm^{-1} and the 2D peak by 7.5 cm^{-1} relative to the peaks of graphene lying on silicon have been obtained. With the help of approach-retraction curves of the probe of an atomic force microscope, a possible deflection of suspended graphene was studied, showing the distances at which the attractive and repulsive forces are located in the probe – suspended graphene system. It has been established that considerable deflection of graphene, by 1 μm at the pore diameter 5 μm, presents challenge to laser focusing. This primarily affects the use of such structures as a basis for gas or fluid sensor of various organic compounds and for suspended graphene based transistors.

Keywords: silicon micropore, graphene, plasma-chemical etching, ion lithography, ultrathin electron-sensitive resist

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00401).

For citation: Tsarik K. A., Nekrasov N. P., Nevolin V. K., Bobrinetskiy I. I. Features of the formation of suspended graphene structures over an array of microsized pores. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 707–714. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2022-27-6-707-714

Введение. В настоящее время при получении сверхтонких мембран микро- и наноэлектромеханических систем [1] и создании сенсорных структур, основанных на изменении электропроводности этих мембран, применяется подвешенный графен. Прочность подвешенного графенового листа позволяет подвергать микроструктуры контролируемым деформациям без их разрушения, а также создавать датчики масс микрообъектов [2]. Возможность графена менять проводимость при появляющихся напряжениях или химических модификациях поверхности рассматривалась в работах [3, 4]. Это, наряду с изменением проводимости в зависимости от появляющихся напряжений при наличии адсорбированных атомов на поверхности графена, позволяет создавать чувствительные сенсоры жидкостей или газов [5, 6]. Кроме того, перспективно внедрение углеродных наноструктур в кремниевую технологию создания устройств микро- и наноэлектроники.

Самый известный способ создания графенового слоя – выращивание его на медной фольге [7] и перенос на кремниевую мембрану с помощью полимерного носителя [8]. Для одновременного наблюдения за механическими и электрофизическими свойствами созданной мембраны необходимо перенести ее на рельефную подложку, например, с металлическими контактами, которые возвышаются над поверхностью на несколько сотен нанометров или микрометров [9], или на подложку с микроразмерными порами, создаваемыми на толстой подложке или на мембране [10].

В настоящей работе предлагается методика создания структур подвешенного графена над сквозными отверстиями в кремниевой мембране на кремниевой подложке.

Эксперимент. Маршрут формирования структур подвешенного графена над массивом микроразмерных пор показан на рис. 1. Для эксперимента выбрали пластины кремния КДБ-12 толщиной 360 мкм. Для осаждения графена применяли жидкостное травление кремния с целью создания мембраны толщиной 60 мкм для последующего травления сквозных пор. В качестве травителя использовали смесь фтористоводородной и азотной кислот ($HF+HNO_3$). Первоначально происходило окисление кремния, а затем окись кремния травили фтористоводородной кислотой. В отсутствие азотной кислоты фтористоводородная не взаимодействует с кремнием. Окисление кремния происходило за счет двуокиси азота из азотной кислоты. Выбранная пропорция кислот ($HF+HNO_3$) составляет 2,5:1. Для травления конкретной области на кремнии (с тыльной стороны) вертикально установлена силиконовая трубка, которая служит маской для травления заданной области. Трубку крепили с помощью химически стойкого лака. Для контролируемого травления смесь кислот подавали дозированно по 150 мкл. Процесс травления в трубке диаметром 8 мм проходил до окончания реакции в течение нескольких секунд, после чего область травления очищали и вновь подавали смесь кислот. Как показали результаты измерения толщины кремниевой мембраны после каждого этапа травления, при подаче одной дозы кислот процесс травления длится порядка 4 с, далее он существенно замедляется. В течение этого времени вытравливается 5,2 мкм кремния. При получении кремниевой мембраны толщиной менее 40 мкм она напрягается, что приводит к ее растрескиванию у одного из краев.



Рис. 1. Последовательность формирования подвешенного над микроразмерной порой графена: 1 – маскирование для химического травления; 2 – мембрана после удаления маски; 3 – маскирование резистом и проведение ионной литографии; 4 – полученные микроразмерные отверстия в кремниевой мембране после плазмохимического травления; 5 – перенос графена с помощью полимерного носителя после стравливания меди; 6 – сформированная структура подвешенного графена над микроразмерной порой

Fig. 1. The sequence of formation of graphene suspended over a microsized pore: 1 – masking for chemical etching; 2 – membrane obtained after removing the mask; 3 – masking with a resist and performing ion lithography; 4 – microsized holes obtained in a silicon membrane after plasma-chemical etching; 5 – graphene transfer with the help of a polymer carrier after etching copper; 6 – the resulting suspended graphene structure over a microsized pore

Далее на образце с мембраной посредством литографии формировали отверстия. На образец наносили 400 нм хрома для маскирования в процессе плазмохимического травления отверстий в мембране, затем наносили резист. Но так как мембрана хрупкая, то использовать контактную литографию нельзя. Среди бесконтактных и бесшаблонных методов формирования литографического рисунка можно выделить метод фокусированного ионного пучка с применением электронно-чувствительного резиста. Метод эффективен тем, что разрешение литографии гораздо выше, чем у лазерной литографии, а экспонирование резиста происходит быстрее, чем электронным лучом, при разрешении на уровне 10 нм. В настоящей работе использовали галлиевый фокусированный ионный пучок диаметром 7 нм, а в качестве чувствительного резиста – позитивный резист AR-P 6200.04. Для создания микронных отверстий в хроме разработан файл-шаблон управления ионным пучком. Учтены размеры будущего процесса травления сквозь маску, путь прохождения пучка, шаг движения пучка при экспонировании, доза воздействия ионов. С помощью сформированной в резисте маски проведено травление хрома (процесс прямой литографии), для осуществления которого использован свежий раствор на основе красной кровяной соли (25 г) и 0,6%-ный KOH (100 мл). Скорость травления хрома составила 60 нм/мин. Травление кремния сквозь полученную маску хрома проводили методом плазмохимического травления с фторсодержащей плазмой (Bosch-процесс). Травление осуществляли на глубину порядка 500–600 нм, затем происходила пассивация стенок полимером, формирующимся в разряде из C_4F_8. Далее за счет ионной составляющей полимер на дне стравливался и процесс травления повторялся. Такой цикличный процесс позволяет контролировать подтравливание под маску во время плазмохимического травления мембраны толщиной 60 мкм, что способствует созданию отверстия в кремниевой мембране диаметром порядка 5 мкм (рис. 2). Процесс проходил при температуре 10 °C при контроле количества циклов. Наличие отверстий фиксировали с помощью оптического микроскопа с увеличением 100× и дополнительным источником света под образцом.

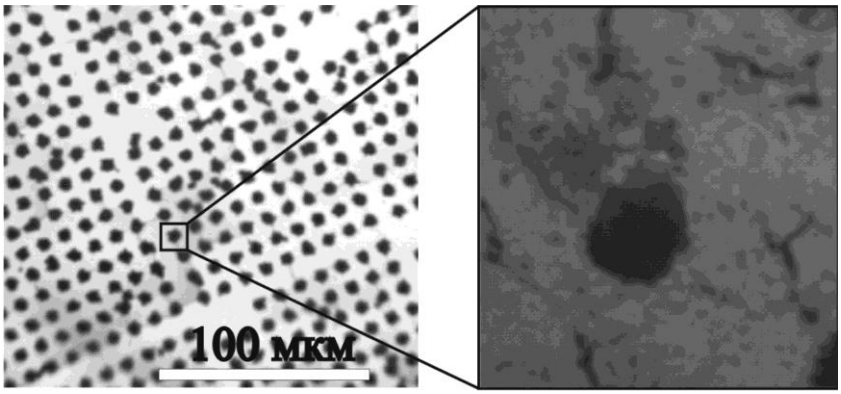


Рис. 2. Микроразмерные поры в кремниевой мембране, покрытые графеном
Fig. 2. Microsized pores in a silicon membrane coated with graphene

Перенос графена с медной пленки на кремниевую мембрану осуществляли с помощью полиметилметакрилата, который наносили на поверхность фольги с графеном. В растворе хлористого железа удаляли медь с графена и получившуюся пленку наносили на образец (см. рис. 1) с дальнейшим удалением полиметилметакрилата в диметилформамиде.

Результаты и их обсуждение. Полученная пленка графена оптически прозрачна, и если расположить источник света под образцом, то под оптическим микроскопом видны светящиеся области в местах отверстий. Наличие над отверстиями графеновой пленки подтверждено с помощью метода комбинированного рассеяния света. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) показывают типичные характерные пики однослойного графена.

На рис. 3 (кривые *2*) показаны G-пик и 2D-пик графена, лежащего на кремнии. Видно, что пики острые и симметричные и соответствуют 1589 и 2682,5 $см^{-1}$ соответственно. У подвешенного графена (см. рис. 3, кривые *1*) эти пики немного шире и расположены на отметках 1593,5 и 2690 $см^{-1}$ соответственно. Сдвиги G-пика на 4,5 $см^{-1}$ и 2D-пика на 7,5 $см^{-1}$ указывают на появление растягивающих напряжений у провисающего над отверстием монослоя графена. Кроме того, для лежащей на кремнии пленки высота G-пика составила 55 у. е., высота 2D-пика – 134 у. е; для подвешенной пленки высота G-пика – 75 у. е., высота 2D-пика – 166 у. е. Высоту рамановских пиков находили при максимальной фокусировке лазерного пятна. Отношение высот 2D-пика к G-пику составило 2,4 для графена на кремнии и 2,21 для подвешенного графена. Установлено, что провисание достигает 1 мкм при диаметре поры 5 мкм.

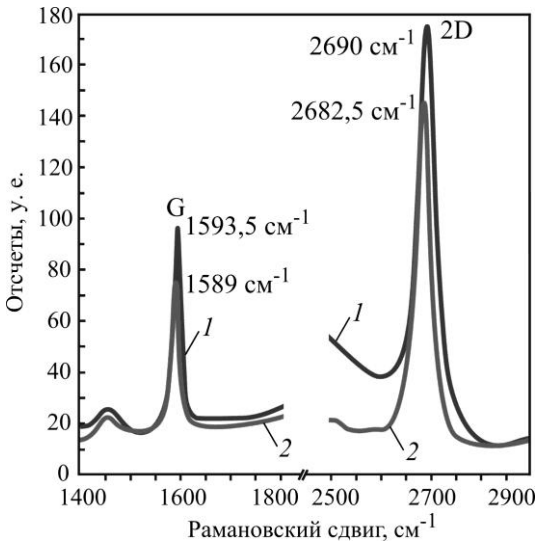


Рис. 3. Рамановские спектры подвешенного (кривые *1*) и лежащего на кремнии (кривые *2*) графена

Fig. 3. Raman spectra of suspended (curves *1*) and silicon-supported (curves *2*) graphene

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследована структура графена, перенесенная на кремниевую подложку со сформированной мембраной. Снята зависимость изменения отклонения балки кантилевера при подводе и отводе от точки, расположенной в центре поры (рис. 4, *а*). При многократном измерении полученные кривые воспроизводятся. Для сравнения построена такая же зависимость на лежащем на кремнии слое (рис. 4, *б*). Из рис. 4 видно, что при приближении к поверхности образца зонд плавно продавливает и натягивает мембрану. При этом скорость изгибания балки кантилевера в направлении от поверхности первоначально небольшая. Когда натяжение пленки графена достигает максимума, то скорость изгиба изменяется до максимального значения и в дальнейшем остается постоянной. В отличие от кривой подвода на твердом основании вне отверстия, скачка зонда к поверхности непосредственно перед касанием зонда поверхности не происходит. Силы, притягивающие друг к другу поверхности зонда и образца вблизи поверхности, имеют место в обоих случаях. Однако в случае с подвешенным графеном он сам приподнимается к зонду и не прогибает вниз балку кантилевера.

Из рис. 4 видно, что кривые отвода имеют одинаковый вид и обратный изгиб (в сторону образца) балки кантилевера. Это происходит из-за смачивания зонда адсорбатом воды, содержащимся на поверхности любого образца при ненулевой влажности. На зонд действует дополнительная сила поверхностного натяжения воды и вандерваальсовы силы между графеном и зондом. В случае с адсорбатом воды во время отвода зонда от образца на границе контакта зонда и образца формируется водяной мениск. При отводе от области образца, где графен лежит на твердой поверхности, воздействие

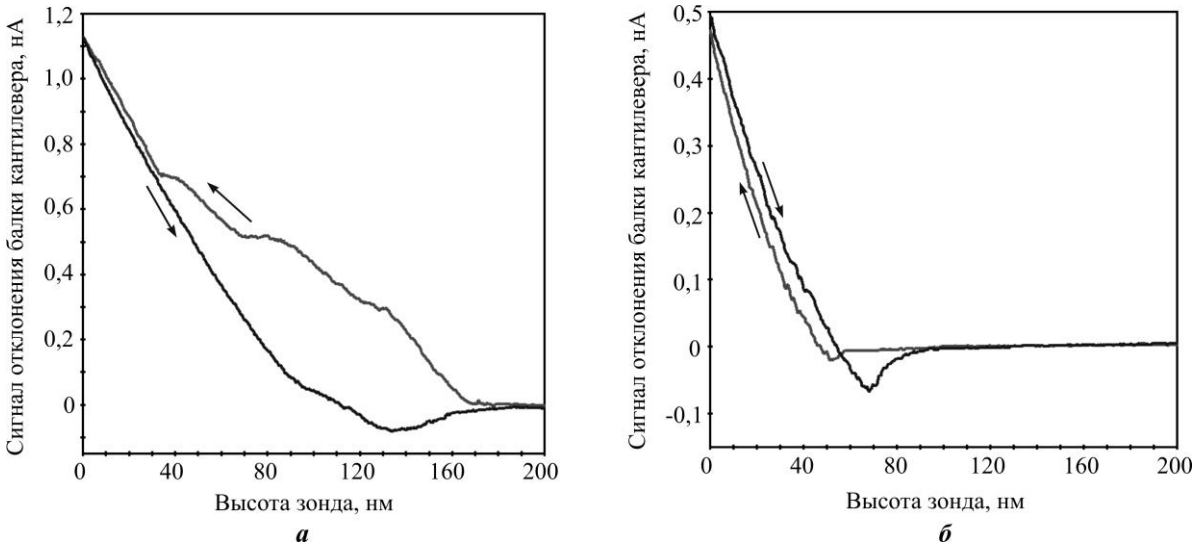


Рис. 4. Изображения кривых подвода-отвода зонда АСМ в центре подвешенного графена (*а*) и на лежащем на кремнии графене (*б*)

Fig. 4. Images of approach-retraction curves of the probe of an atomic force microscope in the center of suspended graphene (*a*) and on graphene lying on silicon (*b*)

сил, притягивающих зонд к графену, прекращается на несколько нанометров выше, чем начиналось при подводе к образцу. При отводе от области образца, где графен висит над порой, воздействие сил, притягивающих зонд к графену, прекращается на той же самой высоте, на которой начиналось воздействие притягивающих сил при подводе к образцу. Иначе говоря, нет дополнительного расстояния удержания зонда. Этот эффект можно объяснить приподнятием графеновой мембраны.

Заключение. Разработанная методика создания структур подвешенного графена над сквозными отверстиями дает возможность изучать механические характеристики подвешенного графена по кривым подвода-отвода, а также спектры КРС, определять особенности размеров и положения пиков при КРС, а также профиль прогиба графена над порой на основе данных АСМ и КРС. Ввиду значительного провисания графена на 1 мкм при диаметре поры 5 мкм фокусировка лазера затруднена. Это в первую очередь влияет на использование структур подвешенного графена в качестве основы для газового или жидкостного сенсора различных органических соединений, а также транзисторов.

Литература

1. ***Tizani L., Saadat I.*** Suspended graphene membranes for strain sensor applications // 2018 IEEE 13th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC). Portland, OR: IEEE, 2018. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/NMDC.2018.8605930

2. Manufacture and characterization of graphene membranes with suspended silicon proof masses for MEMS and NEMS applications / ***X. Fan, A. D. Smith, F. Forsberg et al.*** // Microsyst. Nanoeng. 2020. Vol. 6. Iss. 1. Art. No. 17. https://doi.org/10.1038/s41378-019-0128-4

3. Suspended graphene sensor with controllable width and electrical tunability via direct-write functional fibers / ***A. Regmi, D. Shin, J.-H. Kim et al.*** // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 58. P. 458–465. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.040

4. Dynamic modulation of the Fermi energy in suspended grapheme backgated devices / ***O. M. Dawood, R. K. Gupta, U. Monteverde et al.*** // Sci. Technol. Adv. Mater. 2019. Vol. 20 (1). P. 568–579. https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1612710

5. Suspended graphene arrays for gas sensing applications / ***R. K. Gupta, F. H. Alqahtani, O. M. Dawood et al.*** // 2D Mater. 2020. Vol. 8. No. 2. Art. No. 025006. https://doi.org/10.1088/2053-1583/abcf11

6. Suspended graphene sensors with improved signal and reduced noise / ***Z. Cheng, Q. Li, Zh. Li et al.*** // Nano Lett. 2010. Vol. 10. No. 5. P. 1864–1868. https://doi.org/10.1021/nl100633g

7. Epitaxial growth of large-area single-layer graphene over Cu (1 1 1)/sapphire by atmospheric pressure CVD / ***B. Hu, H. Ago, Y. Ito et al.*** // Carbon. 2012. Vol. 50. Iss. 1. P. 57–65. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.08.002

8. Transfer-free batch fabrication of large-area suspended graphene membranes / ***B. Alemán, W. Regan, Sh. Aloni et al.*** // ACS Nano. 2010. Vol. 4. No. 8. P. 4762–4768. https://doi.org/10.1021/nn100459u

9. High-field electrical and thermal transport in suspended graphene / ***V. E. Dorgan, A. Behnam, H. J. Conley et al.*** // Nano Lett. 2013. Vol. 13. No. 10. P. 4581–4586. https://doi.org/10.1021/nl400197w

10. Hydrophilic and size-controlled graphene nanopores for protein detection / ***G. Goyal, Y. B. Lee, A. Darvish et al.*** // Nanotechnology. 2016. Vol. 27. No. 49. Art. No. 495301. https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/49/495301

Статья поступила в редакцию 14.09.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.09.2022 г.; принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Царик Константин Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tsarik_kostya@mail.ru

Некрасов Никита Петрович – инженер Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), 8141147@gmail.com

Неволин Владимир Кириллович – доктор физико-математических наук, профессор, руководитель Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vkn@miee.ru

Бобринецкий Иван Иванович – доктор технических наук, профессор, ведущий инженер Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), bobrinet@mail.ru

References

1. Tizani L., Saadat I. Suspended graphene membranes for strain sensor applications. *2018 IEEE 13th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC).* Portland, OR, IEEE, 2018, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/NMDC.2018.8605930

2. Fan X., Smith A. D., Forsberg F., Wagner S., Schröder S., Shirin S., Akbari A., Fischer A. C., Villanueva L. G., Östling M., Lemme M. C., Niklaus F. Manufacture and characterization of graphene membranes with suspended silicon proof masses for MEMS and NEMS applications. *Microsyst. Nanoeng.,* 2020, vol. 6, iss. 1, art. no. 17. https://doi.org/10.1038/s41378-019-0128-4

3. Regmi A., Shin D., Kim J.-H., Choi S., Chang J. Suspended graphene sensor with controllable width and electrical tunability via direct-write functional fibers. *Journal of Manufacturing Processes,* 2020, vol. 58, pp. 458–465. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.040

4. Dawood O. M., Gupta R. K., Monteverde U., Alqahtani F. H., Kim H. Y., Sexton J., Young R. J., Missous M., Migliorato M. A. Dynamic modulation of the Fermi energy in suspended graphene backgated devices. *Sci. Technol. Adv. Mater.,* 2019, vol. 20 (1), pp. 568–579. https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1612710

5. Gupta R. K., Alqahtani F. H., Dawood O. M., Carini M., Criado A., Prato M., Garlapati S. K., Jones G., Sexton J., Persaud K. C. et al. Suspended graphene arrays for gas sensing applications. *2D Mater.,* 2020, vol. 8, no. 2, art. no. 025006. https://doi.org/10.1088/2053-1583/abcf11

6. Cheng Z., Li Q., Li Zh., Zhou Q., Fang Y. Suspended graphene sensors with improved signal and reduced noise. *Nano Lett.,* 2010, vol. 10, no. 5, pp. 1864–1868. https://doi.org/10.1021/nl100633g

7. Hu B., Ago H., Ito Y., Kawahara K., Tsuji M., Magome E., Sumitani K, Mizuta N., Ikeda K., Mizuno S. Epitaxial growth of large-area single-layer graphene over Cu (1 1 1)/sapphire by atmospheric pressure CVD. *Carbon,* 2012, vol. 50, iss. 1, pp. 57–65. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.08.002

8. Alemán B., Regan W., Aloni Sh., Altoe V., Alem N., Girit C., Geng B., Maserati L., Crommie M., Wang F., Zettl A. Transfer-free batch fabrication of large-area suspended graphene membranes. *ACS Nano,* 2010, vol. 4, no. 8, pp. 4762–4768. https://doi.org/10.1021/nn100459u

9. Dorgan V. E., Behnam A., Conley H. J., Bolotin K. I., Pop E. High-field electrical and thermal transport in suspended graphene. *Nano Lett.,* 2013, vol. 13, no. 10, pp. 4581–4586. https://doi.org/10.1021/nl400197w

10. Goyal G., Lee Y. B., Darvish A., Ahn C. W., Kim M. J. Hydrophilic and size-controlled graphene nanopores for protein detection. *Nanotechnology,* 2016, vol. 27, no. 49, art. no. 495301. https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/49/495301

The article was submitted 14.09.2022; approved after reviewing 23.09.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Konstantin A. Tsarik – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Scientific and Educational Center "Probe Microscopy and Nanotechnology", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tsarik_kostya@mail.ru

Nikita P. Nekrasov – Engineer of the Scientific and Educational Center "Probe Microscopy and Nanotechnology", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), 8141147@gmail.com

Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Scientific and Educational Center "Probe Microscopy and Nanotechnology", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vkn@miee.ru

Ivan I. Bobrinetskiy – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Senior Engineer of the Scientific and Educational Center "Probe Microscopy and Nanotechnology", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), bobrinet@mail.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2007 по 2021 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 621.382.002
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-715-722

Исследование влияния плазменной обработки на свойства сформированных химическим осаждением из газовой фазы тонких пленок нитрида титана

В. С. Горностай-Польский, В. И. Шевяков

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

Shev@dsd.miee.ru

Аннотация. При создании МДП-структуры с вертикальным каналом существует проблема конформности заполнения металлом углублений в подложке кремния. Для решения данной проблемы используется метод осаждения металлорганических соединений из газовой фазы, который имеет повышенную конформность осаждения пленок на рельефную поверхность. При использовании данного метода дополнительно может применяться операция плазменной обработки пленки для повышения ее качества. В работе исследовано влияние процесса плазменной обработки при химическом осаждении из газовой фазы тонких пленок нитрида титана на их электрофизические, механические и конструктивные свойства. Показано, что плазменная обработка пленок нитрида титана является эффективной для улучшения электрофизических, механических и конструктивных свойств пленок нитрида титана, полученных химическим осаждением из газовой фазы. Исследована зависимость толщины пленки нитрида титана от длительности плазменной обработки. Установлено, что толщина пленок нитрида титана уменьшается на 30–50 %, что, предположительно, связано с уплотнением материала пленки из-за удаления значительной части примесей водорода и углерода. Выявлена зависимость проводимости пленок нитрида титана от длительности плазменной обработки. Исходное среднее значение удельного объемного сопротивления нитрида титана, равное 43 мкОм·см, в процессе плазменной обработки уменьшилось до 36 мкОм·см. Анализ морфологии поверхности нитрида титана методом атомно-силовой микроскопии не показал существенного влияния плазменной обработки на шероховатость поверхности пленок. В результате оценки значение механических напряжений в пленках нитрида титана до плазменной обработки составило ~ 400 кПа, затем оно уменьшилось (на ~10 %). Получено оптимальное значение длительности плазменной обработки при указанных технологических параметрах, равное 40 с. Установлено, что процесс химического осаждения из газовой фазы обеспечивает возможность конформного заполнения высокоаспектных углублений в кремнии.

© В. С. Горностай-Польский, В. И. Шевяков, 2022

Ключевые слова: нитрид титана, химическое осаждение, высокое аспектное отношение, металлические контакты, рельефная поверхность

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-29-01095).

Для цитирования: Горностай-Польский В. С., Шевяков В. И. Исследование влияния плазменной обработки на свойства сформированных химическим осаждением из газовой фазы тонких пленок нитрида титана // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 715–722. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-715-722

Original article

Investigation of the effect of plasma treatment on the properties of titanium nitride thin films formed by chemical vapor deposition

V. S. Gornostay-Polsky, V. I. Shevyakov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Shev@dsd.miee.ru

Abstract. During the formation of MIS structure, conformity of filling trenches on the silicon substrate by the metal is one of the problems. The method of organometallic compounds deposition from the gas phase is used to solve this problem and is potentially characterized by an increased conformity of film deposition on a relief surface. This process can be multi-stage, when, within one stage, after the deposition of a metal film of a certain thickness, plasma treatment of the film follows to improve the quality of the deposited metal film. In this work, the influence of the cyclic plasma treatment process in the method of chemical vapor deposition of thin films of titanium nitride on their electrical, mechanical and structural properties is studied. The dependence of the titanium nitride film thickness to the duration of plasma treatment was investigated. It has been established that the film thickness decreases by 30–50 %, which is supposedly associated with the compaction of the film material due to the removal of a significant part of the hydrogen and carbon impurities contained in it. The dependence of the conductivity of titanium nitride films on the duration of plasma treatment is revealed. The initial average volume resistivity of titanium nitride, which is 43 μΩ·cm, decreased to 36 μΩ·cm during plasma treatment. Analysis of the surface morphology of titanium nitride by atomic force microscopy showed no significant effect of plasma treatment on the surface roughness of the films. As a result of the study and calculation, the value of built-in mechanical stresses in titanium nitride films before plasma treatment was ~ 400 kPa, then it decreased (by ~ 10 %). Based on the obtained results, the optimal value of the duration of plasma treatment with the specified technological parameters is 40 s. It has been established that the process of chemical vapor deposition provides the possibility of conformal filling of high-aspect trenches in silicon.

Keywords: titanium nitride, chemical deposition, high aspect ratio, metal contacts, relief surface

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-29-01095)

For citation: Gornostay-Polsky V. S., Shevyakov V. I. Investigation of the effect of plasma treatment on the properties of titanium nitride thin films formed by chemical vapor deposition. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 715–722. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-715-722

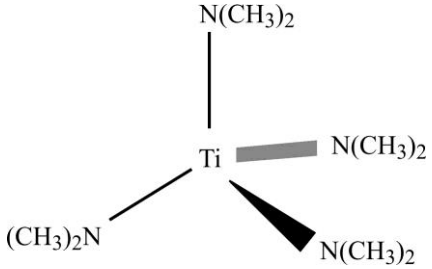
Введение. Существенное улучшение характеристик ИС обеспечивается уменьшением топологических норм и разработкой новых, более совершенных конструктивных вариантов активных элементов. В последнее время разработан ряд силовых транзисторных МДП-структур как ключевых компонентов силовых устройств [1–4]. К таким структурам относится транзисторная МДП-структура с вертикальным каналом, характеризующаяся повышенным пробивным напряжением. Особенность ее конструкции – наличие металлических контактов с высоким аспектным отношением к заглубленным в кремнии истоковым, стоковым и затворной областям [1]. Металлические контакты включают в себя диффузионно-барьерный слой, расположенный по периферии в углублениях, и слой вольфрама, заполняющий углубления.

При создании данной структуры одна из проблем связана с конформностью заполнения металлом углублений в подложке кремния [2, 3]. Среди современных методов осаждения тонких металлических слоев наиболее предпочтительны вакуумные: физическое (PVD) и химическое (CVD) осаждения из газовой фазы [3]. Однако метод PVD применим при заполнении углублений с аспектным отношением не более чем 5:1. Одним из перспективных является метод осаждения металлорганических соединений из газовой фазы (MOCVD), характеризующийся повышенной конформностью осаждения пленок на рельефную поверхность [5, с. 13–16]. Данный процесс может быть многоцикличным, когда в течение одного цикла после осаждения пленки металла определенной толщины осуществляется плазменная обработка для повышения качества осаждаемой пленки [6–8].

В настоящей работе исследуется влияние процесса плазменной обработки методом MOCVD тонких пленок нитрида титана TiN на их электрофизические, механические и конструктивные свойства.

Методика эксперимента. Объект исследования – пленки TiN, представляющие собой слои диффузионного барьера в структуре металлических заглубленных контактов транзисторной МДП-структуры с вертикальным каналом [1]. Поперечное сечение данной структуры приведено на рис. 1.

В экспериментах предварительно на поверхность кремниевых подложек, содержащих локальные углубления, наносили слой TEOS толщиной 150 нм. Химическим осаждением из газовой фазы в установке кластерного типа AMAT Endura HP PVD 5500 осаждали TiN из содержащегося в ампуле жидкого источника (прекурсора) – тетра(диметиламино)титана $Ti[N(CH_3)_2]_4$ – на нагретые до 400 °C подложки. Структурная формула прекурсора имеет вид



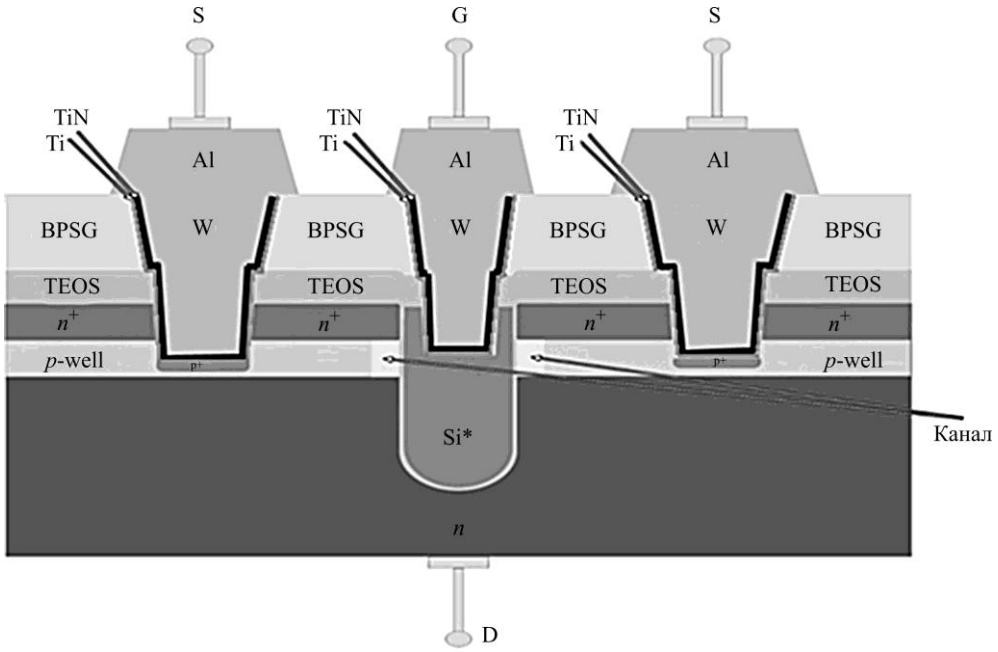


Рис. 1. Поперечное сечение транзисторной МДП-структуры с вертикальным каналом (BPSG – борофосфорное силикатное стекло, TEOS – диоксид кремния, полученный осаждением из паров тетраэтоксисилана)
Fig. 1. Cross section of the MIS-transistor structure with a vertical channel (BPSG – borophosphoric silicate glass, TEOS – silicon dioxide obtained by precipitation from tetraethoxysilane vapors)

Для предотвращения конденсации $Ti[N(CH_3)_2]_4$ температуру верхней части ампулы поддерживали на уровне 60 °C, а линию подачи газа-носителя (гелия) – при температуре 70 °C. Реакцию осаждения TiN можно описать следующим выражением:

$$Ti[N(CH_3)_2]_4 \rightarrow TiN(C,H) + HN(CH_3)_2 + \text{другие углеводороды}.$$

Данный процесс многоцикличный. Цикл содержит две стадии: первая – осаждение пленки TiN толщиной 5 нм, вторая – обработка пленки в плазме H_2-N_2 для ее уплотнения и удаления примесей (C и H). При этом мощность плазмы 500 Вт, давление в камере ~ 1 Па. Расход газовой смеси: H_2 – 300 см^3/мин, N_2 – 200 см^3/мин. Длительность одного цикла плазменной обработки варьировали от 30 до 45 с. На рис. 2 приведена схема цикла процесса осаждения пленки TiN.

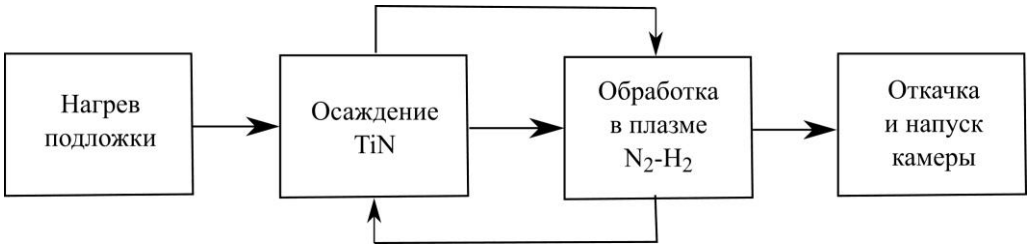


Рис. 2. Цикл процесса осаждения пленки нитрида титана
Fig. 2. The cycle of of titanium nitride deposition process

Исследование электрофизических, механических и конструктивных параметров пленок проводили после осаждения и плазменной обработки TiN. Толщину осажденных пленок TiN измеряли на скаттерометре KLA Spectra CD-200 (точность измерения 0,1 нм). Поверхностное сопротивление определяли четырехзондовым методом. Для измерения механических напряжений в пленках применяли профилометр KLA Tencor FLX-5500. Он позволяет измерить кривизну подложки и посредством расчета оценить значение механических напряжений, вызванных нанесением слоя.

Внутренние механические напряжения рассчитываются по формуле

$$\sigma = \frac{E}{(1-\nu)}\frac{h^2}{6t}\left[\frac{1}{R_2}-\frac{1}{R_1}\right],$$

где E – модуль Юнга для подложки; ν – коэффициент Пуассона; h – толщина пластины; t – толщина пленки; R_1 и R_2 – радиусы кривизны подложки до нанесения пленки и после соответственно.

Морфологию поверхности пленок исследовали с применением атомной силовой микроскопии. Поперечное сечение структуры локальных углублений в подложке для анализа комформности заполнения углублений двухслойным покрытием Ti-TiN исследовали с помощью растрового электронного микроскопа. После нанесения слоев титана и нитрида титана для улучшения контраста на подложки наносили дополнительный слой TEOS.

Результаты и их обсуждение. При исследовании зависимости толщины пленки TiN от длительности плазменной обработки установлено, что толщина пленок уменьшается на 30–50 %. Это связано с уплотнением материала пленки, поскольку, предположительно, в процессе плазменной обработки значительная часть примесей водорода и углерода, содержащихся в пленке TiN после ее осаждения, удаляется как с поверхности, так и из ее объема. Химические реакции включают в себя замещение водорода и углерода в осажденном слое азотом из области плазмы. Водород также в плазме реагирует с углеродными примесями для получения летучих углеводородов. Выявлено, что плазменная обработка приводит к снижению равномерности толщины пленки по пластине не более чем на 2,5 %. Это несущественно для оценки качества данного метода в отношении поставленных задач. На рис. 3, *а*, *б* представлены графики зависимостей среднего значения толщины и неравномерности толщины по пластине слоя пленки TiN от длительности обработки соответственно. При исследовании зависимости проводимости пленок TiN от длительности плазменной обработки установлено, что она повышается. Это также связано с удалением примесей водорода и углерода из пленки. На рис. 3, *в* приведена зависимость среднего поверхностного сопротивления пленки от длительности плазменной обработки.

Дальнейшее исследование показало следующее. Исходное среднее значение удельного объемного сопротивления пленки TiN, составляющее 43 мкОм·см, в процессе плазменной обработки уменьшилось до 36 мкОм·см. Анализ морфологии поверхности пленки TiN методом атомно-силовой микроскопии не показал существенного влияния плазменной обработки на шероховатость ее поверхности. Механическое напряжение в пленках TiN до плазменной обработки составило ~ 400 кПа, затем оно уменьшилось (на ~10 %). Оптимальная длительность плазменной обработки при указанных ее технологических параметрах, исходя из полученных результатов, составляет 40 с.

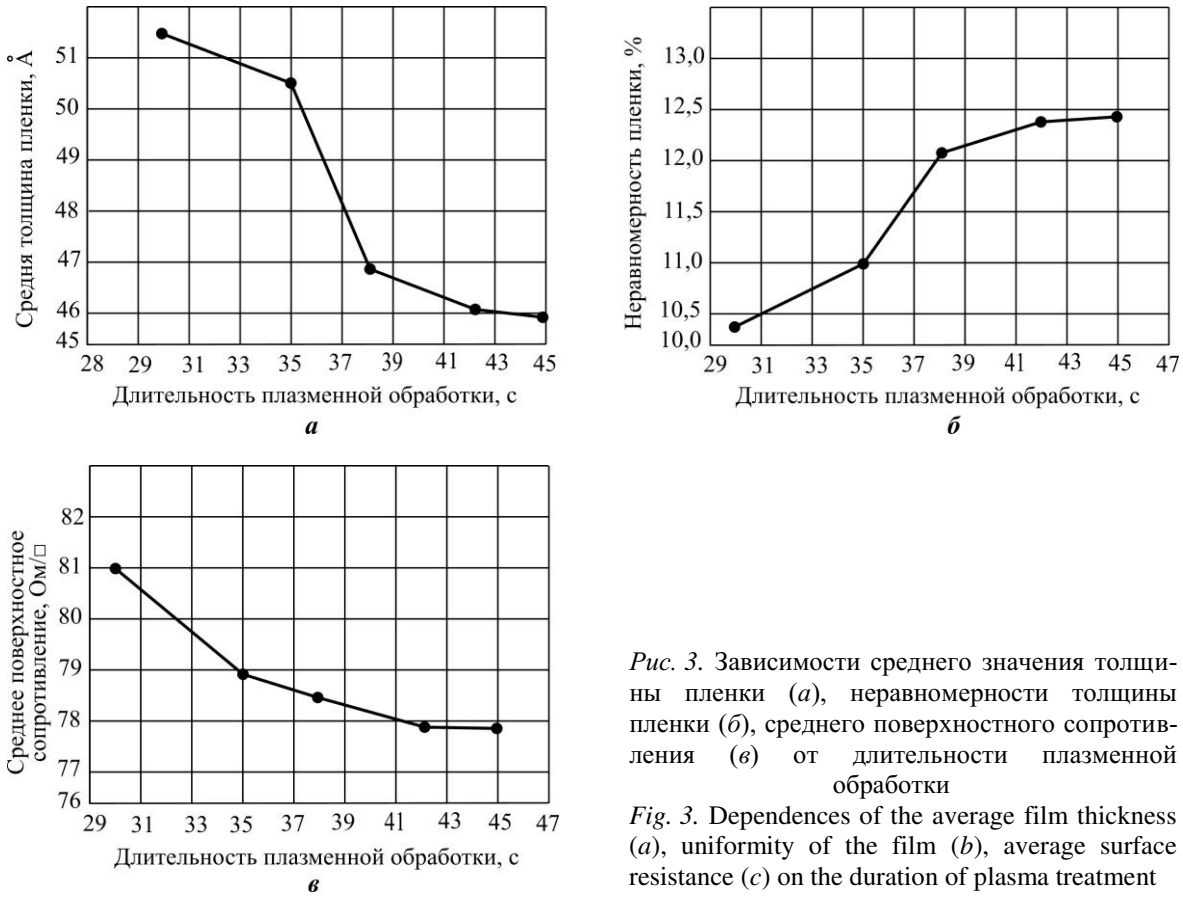


Рис. 3. Зависимости среднего значения толщины пленки (*а*), неравномерности толщины пленки (*б*), среднего поверхностного сопротивления (*в*) от длительности плазменной обработки

Fig. 3. Dependences of the average film thickness (*a*), uniformity of the film (*b*), average surface resistance (*c*) on the duration of plasma treatment

На рис. 4 приведено полученное методом растровой электронной микроскопии изображение поперечного сечения фрагмента подложки кремния с углублением, содержащим двухслойное покрытие Ti-TiN. Как следует из рисунка, двухслойное покрытие Ti-TiN конформно заполняет высокоаспектное углубление в кремнии.

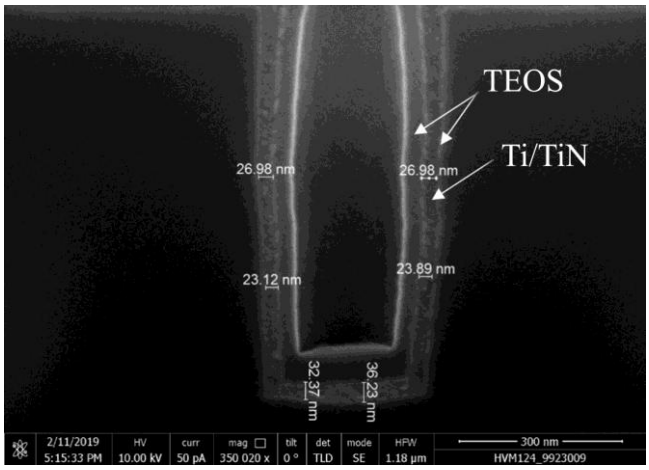


Рис. 4. Поперечное сечение фрагмента подложки кремния с углублением, содержащим двухслойное покрытие Ti-TiN

Fig. 4. Cross section of a fragment of a silicon substrate with a trench filled with Ti-TiN coating

Заключение. Из результатов исследования следует, что метод MOCVD может применяться при создании слоя Ti-TiN диффузионного барьера в структуре металлических заглубленных контактов в транзисторной МДП-структуре с вертикальным каналом для улучшения электрофизических, механических и конструктивных свойств пленок TiN.

Литература

1. ***Gornostay-Polsky V. S., Shevyakov V. I.*** Investigation of the deposition features and characteristics of diffusion-barrier layers of Ti-TiN for metallization in MIS-transistor structures with a vertical channel // Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics. 2022. Vol. 12157. Art. No. 121571A. https://doi.org/10.1117/12.2624508

2. ***Baliga B. J.*** Advanced power MOSFET concepts. New York: Springer, 2010. XVI, 562 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5917-1

3. ***Saxena R. S., Kumar M. J.*** Trench gate power MOSFET: recent advances and innovations // Advances in Microelectronics and Photonics / ed. S. Jit. Hauppage, NY: Nova Science, 2012. Vol. 1. P. 1–23.

4. ***Васильев В. Ю.*** Химическое осаждение из газовой фазы тонких пленок для электроники. Новосибирск: НГТУ, 2010. 202 с.

5. Electrografted copper seed layer for high aspect ratio TSVs interposer metallization / ***F. Gaillard, L. Religieux, T. Mourier et al.*** // Processing Materials of 3D Interconnects, Damascene, and Electronics Packaging / eds K. Kondo, R. Akolkar, D. P. Barkey et al. Cancun: ECS, 2014. P. 9–22.

6. Study on the effect of plasma treatment on flat-band-voltage and equivalent oxide thickness using metal-organic chemical vapor deposition TiN film as p-MOSFETS metal gate electrode / ***J. Gao, H. Yang, G. Bai et al.*** // J. Nanomedic. Nanotechnol. 2016. Iss. S7. Art. No. 005. https://doi.org/10.4172/2157-7439.S7-005

7. Effect of N_2/H_2 plasma treatment on the moisture adsorption of MOCVD-TiN films / ***J. K. Huang, Ch.-L. Huang, Sh.-Ch. Chang et al.*** // Thin Solid Films. 2011. Vol. 519. Iss. 15. P. 4948–4951. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.059

8. Plasma over-treatment effect on the MOCVD-TiN contact glue layer / ***Sh.-Ch. Chang, Y.-L. Wang, D.-Y. Chan et al.*** // Surface & Coatings Technology. 2008. Vol. 203. Iss. 5–7. P. 648–651. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.05.053

Статья поступила в редакцию 02.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 09.08.2022 г.;
принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Горностай-Польский Вадим Станиславович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vad00711@gmail.com

Шевяков Василий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), shev@dsd.miee.ru

References

1. Gornostay-Polsky V. S., Shevyakov V. I. Investigation of the deposition features and characteristics of diffusion-barrier layers of Ti-TiN for metallization in MIS-transistor structures with a vertical channel. *Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics,* 2022, vol. 12157, art. no. 121571A. https://doi.org/10.1117/12.2624508

2. Baliga B. J. *Advanced power MOSFET concepts.* New York, Springer, 2010. xvi, 562 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5917-1

3. Saxena R. S., Kumar M. J. Trench gate power MOSFET: recent advances and innovations. *Advances in Microelectronics and Photonics,* ed. S. Jit. Hauppage, NY, Nova Science, 2012, vol. 1, pp. 1–23.

4. Vasiliev V. Yu. *Chemical vapor deposition of thin films for electronics.* Novosibirsk, NGTU Publ., 2010. 202 p. (In Russian).

5. Gaillard F., Religieux L., Mourier T., Ribière C., Vandroux L., Suhr D., Raynal F., Mevellec V. Electrografted copper seed layer for high aspect ratio TSVs interposer metallization. *Processing Materials of 3D Interconnects, Damascene, and Electronics Packaging,* eds K. Kondo, R. Akolkar, D. P. Barkey et al. Cancun, ECS, 2014, pp. 9–22.

6. Gao J., Yang H., Bai G., Li J., Zhao Ch. Study on the effect of plasma treatment on flat-band-voltage and equivalent oxide thickness using metal-organic chemical vapor deposition TiN film as p-MOSFETS metal gate electrode. *J. Nanomedic. Nanotechnol.,* 2016, iss. S7, art. no. 005. https://doi.org/10.4172/2157-7439.S7-005

7. Huang J. K., Huang Ch.-L., Chang Sh.-Ch., Cheng Y.-L., Wang Y-L. Effect of N_2/H_2 plasma treatment on the moisture adsorption of MOCVD-TiN films. *Thin Solid Films,* 2011, vol. 519, iss. 15, pp. 4948–4951. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.059

8. Chang Sh.-Ch., Wang Y.-L., Chan D.-Y., Huang J. K., Wang M.-T. Plasma over-treatment effect on the MOCVD-TiN contact glue layer. *Surface & Coatings Technology,* 2008, vol. 203, iss. 5–7, pp. 648–651. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.05.053

The article was submitted 02.08.2022; approved after reviewing 09.08.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Vadim S. Gornostay-Polsky – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vad00711@gmail.com

Vasily I. Shevyakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the of Integrated Electronics and Microsystems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), shev@dsd.miee.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала
можно оформить на сайтах:

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

Научная статья
УДК [621.382.2/.3]:620.3
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-723-739

Формирование планарных автоэмиссионных приборов на основе углеродных нанотрубок на сплаве Co-Nb-N-(O)

Д. Г. Громов[1,2], Г. С. Ерицян[1], Е. П. Кицюк[3], А. И. Савицкий[1,3], С. Н. Скорик[3], С. В. Дубков[1], Е. Д. Гринаковский[1,3], С. В. Булярский[3,4], А. А. Дудин[4], Л. С. Волкова[4], Е. М. Еганова[4], А. Ю. Трифонов[1,5], М. В. Поляков[4], А. П. Орлов[4], Г. А. Рудаков[4], В. В. Светухин[3]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия
[3]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия
[4]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия
[5]Научно-исследовательский институт физических проблем имени Ф. В. Лукина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

andr.savitskiy@gmail.com

Аннотация. Интегральные автоэмиссионные приборы и ИС на их основе являются перспективным направлением микроэлектроники, которое связано с использованием низковольтных и стабильных автоэлектронных эмиттеров на базе наноматериалов, таких как углеродные нанотрубки (УНТ). Планарная конструкция автоэмиссионного прибора позволяет формировать УНТ на торце тонкой пленки катализатора толщиной 1–50 нм. В работе представлены результаты реализации интегральной технологии изготовления планарных автоэмиссионных диодов с катодом из УНТ, сформированных на торце тонкой проводящей пленки. УНТ выращены методом химического осаждения из паровой фазы. В качестве катализатора для выращивания использована тонкая пленка исходно аморфного сплава Co-Nb-N-(O). Особенность технологии состоит в кристаллизации сплава Co-Nb-N-(O) при нагреве в процессе химического осаждения из паровой фазы. В результате на поверхности сплава формируются наночастицы Co, которые являются катализатором роста УНТ. Показано, что эта особенность позволяет сформировать УНТ локально, только на открытых участках сплава Co-Nb-N-(O), например на торцах тонкой пленки. Обоснован выбор сплава Co-Nb-N-(O). Описаны этапы формирования планарных автоэмиссионных диодов на кремниевой подложке с использованием стандартных производственных технологических процессов. Приведены результаты измерения ВАХ приборов. Показано, что вид ВАХ обусловлен полевой эмиссией, характерной для УНТ. Разработанный технологический прием локального синтеза УНТ на торце топологически

© Д. Г. Громов, Г. С. Ерицян, Е. П. Кицюк, А. И. Савицкий, С. Н. Скорик, С. В. Дубков, Е. Д. Гринаковский, С. В. Булярский, А. А. Дудин, Л. С. Волкова, Е. М. Еганова, А. Ю. Трифонов, М. В. Поляков, А. П. Орлов, Г. А. Рудаков, В. В. Светухин, 2022

оформленных областей тонкой пленки сплава Co-Nb-N-(O) может быть встроен в интегральную технологию формирования планарных автоэмиссионных приборов.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, сплав, планарный электровакуумный диод, электронная эмиссия, плазмостимулированное химическое осаждение из газовой фазы

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Государственного соглашения 2020–2022 № FSMR-2020-0018 и РФФИ (проект № 19-38-90206).

Для цитирования: Формирование планарных автоэмиссионных приборов на основе углеродных нанотрубок на сплаве Co-Nb-N-(O) / Д. Г. Громов, Г. С. Ерицян, Е. П. Кицюк и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 723–739. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-723-739

Original article

Formation of planar field-emission devices based on carbon nanotubes on Co-Nb-N-(O) alloy

D. G. Gromov[1,2], G. S. Eritsyan[1], E. P. Kitsyuk[3], A. I. Savitsky[1,3], S. N. Skorik[3], S. V. Dubkov[1], E. D. Grinakovskiy[1,3], S. V. Bulyarskiy[3,4], A. A. Dudin[4], L. S. Volkova[4], E. M. Eganova[4], A. Yu. Trifonov[1,5], M. V. Poliakov[4], A. P. Orlov[4], G. A. Rudakov[4], V. V. Svetukhin[3]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia
[3]SMC "Technological Centre", Moscow, Russia
[4]Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[5]Scientific Research Institute for Physical Problems named after F. V. Lukin of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

andr.savitskiy@gmail.com

Abstract. Integrated field-emission devices and ICs based on them are promising trend in microelectronics that is related to the use of low-voltage and stable autoelectronic emitters based on nanomaterials, such as carbon nanotubes (CNTs). Planar construction of field-emission devices allows the formation of CNTs at the end of 1–50 nm thick catalyst film. In this work, the results of the implementation of an integrated technology for the manufacture of planar field-emission diodes with a cathode made of CNTs formed at the end of a thin conducting film are presented. Thin film of an initially amorphous Co-Nb-N-(O) alloy was used as a catalyst for growing CNTs by chemical vapor deposition. A feature of the technology is the crystallization of the Co-Nb-N-(O) alloy during heating in the chemical deposition. As a result, cobalt nanoparticles form on the surface of the alloy and they are the catalyst for the growth of CNTs. It was shown that this feature makes it possible to form CNTs locally, only in open areas of the Co-Nb-N-(O) alloy, for example, at the ends of a thin film. The

choice of the Co-Nb-N-(O) alloy has been substantiated. The stages of planar field-emission diodes formation on a silicon substrate using standard manufacturing processes are described. The results of measurements of current-voltage characteristics of devices are presented. It has been demonstrated that the current-voltage characteristics type is determined by the field emission specific for CNTs. The developed processing method of local synthesis of CNTs at the ends of topologically formed areas of thin film of the Co-Nb-N-(O) alloy can be incorporated into integrated technology for the manufacture of planar field-emission devices.

Keywords: carbon nanotubes, alloy, planar electrovacuum diode, electron emission, plasma-enhanced chemical vapor deposition

Funding: the work has been supported by the State assignment 2020–2022 No. FSMR-2020-0018 and the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-38-90206).

For citation: Gromov D. G., Eritsyan G. S., Kitsyuk E. P., Savitsky A. I., Skorik S. N., Dubkov S. V., Grinakovskiy E. D., Bulyarskiy S. V., Dudin A. A., Volkova L. S., Eganova E. M., Trifonov A. Yu., Poliakov M. V., Orlov A. P., Rudakov G. A., Svetukhin V. V. Formation of planar field-emission devices based on carbon nanotubes on Co-Nb-N-(O) alloy. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 723–739. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-723-739

Введение. Изделия полупроводниковой электроники на *p–n*-переходах характеризуются низкой радиационной стойкостью из-за возникновения радиационных дефектов, вызываемых высокоэнергетическими частицами. Это приводит к нарушению работы *p–n*-переходов ввиду возрастания токов утечки и, как следствие, к выходу из строя ИС [1–3]. Автоэмиссионные приборы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) имеют повышенную стойкость к облучению. Интегральные автоэмиссионные микроприборы и ИС на их основе – перспективное направление микроэлектроники, связанное с использованием низковольтных и стабильных автоэлектронных эмиттеров на базе наноматериалов, таких как УНТ. Высокое аспектное отношение в сочетании с большой механической прочностью [4] и химической стабильностью [5] позволяют использовать УНТ в качестве автоэмиссионных катодов электровакуумных устройств в отличие от других материалов, например молибдена [6], кремния [7], алмаза [8], графита [9].

В планарной технологии наноэлектронных элементов катализаторы формируются на основе тонких пленок из веществ, одно из которых является катализатором, а другое – барьерным слоем. Пленка катализатора составляет 2–4 нм и состоит, как правило, из переходных металлов [10, 11]. Наночастицы катализатора формируются в результате последовательного окисляющего отжига, который устраняет загрязнения, и восстанавливающего отжига, который формирует наночастицы катализатора. Такая технология имеет следующие существенные недостатки. На границе катализатора, барьерного слоя и подложки происходят многочисленные взаимодействия, и границы слоев претерпевают существенные изменения [11]. В частности, металл катализатора диффундирует в барьерный слой и подложку, где формируются интерметаллические соединения, увеличивающие последовательное сопротивление автоэлектронного эмиттера. Кроме того, наблюдается явление коалесценции (мелкие наночастицы катализатора объединяются в более крупные). Распределение наночастиц по размерам становится более широким, а его максимум смещается в сторону больших диаметров. Это негативно сказывается на работе автоэлектронных эмитте-

ров, так как поле на эмитирующем конце нанотрубки уменьшается и надо увеличивать напряжение анода для получения необходимого тока эмиссии.

Планарная конструкция автоэмиссионного прибора, в которой УНТ формируются узким слоем в виде «лезвия» на торце тонкой пленки катализатора (Fe, Co, Ni) толщиной 1–50 нм [12–14], – один из способов решения указанных проблем. Однако у такого способа есть недостатки: низкая адгезия УНТ к поверхности каталитической пленки и плохо управляемый рост УНТ из-за специфики процесса химического осаждения из паровой фазы (ХОПФ) на узком слое, в результате чего соседние трубки получаются разной и неконтролируемой длины и направленности.

В работе [15] описаны полученные структуры с УНТ, синтезированными на каталитическом аморфном сплаве. Продемонстрирована возможность локального роста УНТ достаточно однородных по длине и направленности на торцах пленки Ni-Nb-N-(O) толщиной 300 нм, так как они растут в виде массива [16]. Предложенный подход применения многокомпонентных пленок сплавов позволяет провести операцию травления и затем при термообработке локально сформировать частицы катализатора на поверхности тонкой пленки сплава.

Цель настоящей работы – разработка процесса локального синтеза УНТ на торцах топологически оформленных областей тонкой пленки сплава Co-Nb-N-(O) со встраиванием этого процесса в существующую интегральную планарную технологию, а также изучение электрофизических характеристик сформированных автоэмиссионных приборов.

Эксперимент. В качестве тестовой структуры планарного автоэмиссионного диода разработана топология встречно-штыревого типа. Подобная конструкция позволяет получить высокую плотность размещения структур с УНТ, занимая при этом малую площадь. Поперечный вид структуры схематично показан на рис. 1.

Тестовая структура выполнена на термически окисленной кремниевой подложке, покрытой тонким слоем Si_3N_4, который имеет технологическую функцию стоп-слоя при изготовлении топологии. Структура представляет собой два электрода (катод и анод) из тонкой пленки сплава Co-Nb-N-(O). Массив УНТ формируется локально на торце электродов. В идеальном случае для получения выпрямляющей характеристики желательно, чтобы анод был выполнен из другого материала, на котором невозможен рост УНТ. Однако это требует более сложного маршрута изготовления с дополнительными технологическими операциями. Для изучения автоэмиссионных возможностей УНТ на торце электрода изготовлена симметричная структура: УНТ как на аноде, так и катоде, т. е. при обратном включении можно наблюдать автоэмиссионную характеристику, а не обратную ветвь диода.

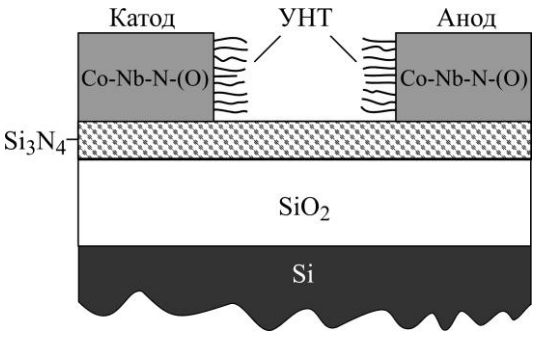


Рис. 1. Поперечный разрез структуры тестового планарного автоэмиссионного прибора
Fig. 1. Cross section of the test planar structure of field-emission device

Исходная пленка каталитического сплава сформирована на поверхности подложек монокристаллического кремния диаметром 100 мм. Подложки предварительно были обработаны в растворе КАРО и перекисно-аммиачном растворе, затем окислены на толщину SiO_2 0,65 мкм в диффузионной печи при температуре 1000 °С. Далее мето-

дом химического осаждения из газовой смеси дихлорсилана и аммиака при температуре 780 °C сформированы тонкие пленки нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 0,17 мкм.

Тонкая пленка катализатора Co-Nb-N-(O) толщиной 0,3 мкм сформирована методом магнетронного распыления сплавной мишени Nb-Co (70/30 масс. %) в газовой смеси аргона с азотом при комнатной температуре. Источником кислорода в слое катализатора является остаточная атмосфера, в результате чего уровень содержания кислорода оказывается нерегулируемым параметром в процессе осаждения и определяется остаточным давлением в камере, которое составляло $5 \cdot 10^{-5}$ торр. Соотношение давлений газов в смеси Ar/N_2 задано 9:1, общее давление в камере поддерживали на уровне $3 \cdot 10^{-3}$ торр. Мощность на магнетроне в процессе напыления составляла 600 Вт. Перед распылением мишени поверхность подложки предварительно была подвергнута зачистке ионами аргона.

Поверхность тонкой пленки Co-Nb-N-(O) покрыта слоем SiO_2 толщиной 0,8 мкм, который сформирован методом плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы при температуре 160 °C с использованием смеси моносилана и кислорода. Сформированный слой SiO_2 в дальнейшем выполнял функции маскирующего слоя при последующем травлении пленки Co-Nb-N-(O) и защитного слоя в процессе синтеза УНТ, предотвращая рост УНТ на поверхности. Для формирования топологии тестового планарного эмиссионного прибора путем фотолитографии сформирована фоторезистивная маска. Далее структуру подвергали травлению ионами аргона для удаления слоев SiO_2 и Co-Nb-N-(O) до Si_3N_4. При этом мощность, подаваемая на источник, составляла 1200 Вт. Поток ионов вытягивался с помощью сетки диаметром 30 см, к которой было приложено напряжение 300 В, при этом ток равен 450 мА. Травление слоя проведено под углом 5° относительно нормали при напряжении ускорения 500 В. Во время травления для лучшей однородности подложка вращалась относительно своей оси со скоростью 20 об/мин. После удаления слоя фоторезиста открытыми оставались торцы пленки Co-Nb-N-(O), что позволило провести боковой синтез УНТ.

УНТ выращены методом плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы. Процесс синтеза проходил при температуре 650 °C в течение 15 с в газовой смеси ацетилена, аммиака и аргона в соотношении 1:1:3. Суммарное давление в камере составляло 2 торр. Мощность высокочастотной составляющей плазмы 20 Вт, низкочастотной – 30 Вт. Наночастицы катализатора, необходимые для роста УНТ, сформированы из сплава Co-Nb-N-(O) непосредственно перед синтезом УНТ в процессе нагрева до температуры 650 °C. Изготовленные образцы тестовых планарных автоэмиссионных приборов исследованы с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM-2100 Plus, оснащенного приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа EDAX. Также для проведения исследований использован электронно-ионный растровый микроскоп FEI Helios NanoLab 650i DualBeam.

Схема стенда для измерения адгезии и фотография его фрагмента представлены на рис. 2. К поверхности массива УНТ с использованием клея-геля Loctite 454 приклеен диск площадью 2,3 мм^2, к которому предварительно была припаяна консоль. Исследуемый образец помещен на специальную подставку и надежно закреплен посредством специальной планки. Консоль прикреплена к электронному динамометру. Динамометр нагружен до отрыва консоли от образца с фиксацией значения усилия отрыва F. Давление, с которым происходит отрыв консоли, равно: $P = F/S$, где S – площадь приклеенного к массиву УНТ диска.

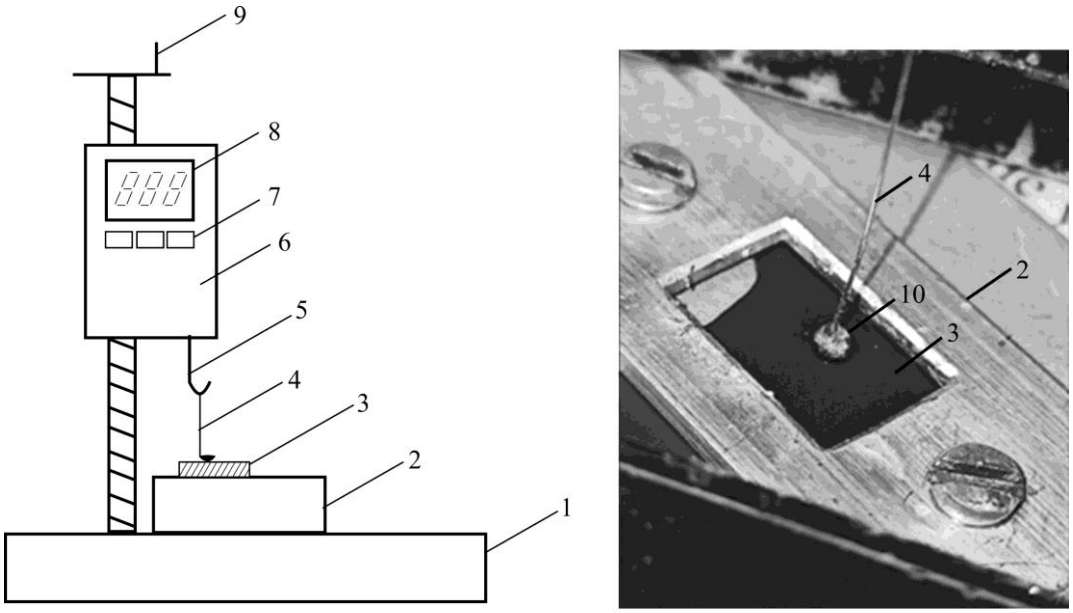


Рис. 2. Схема стенда для измерения адгезии (*а*) и фотография его фрагмента (*б*): 1 – основание установки; 2 – подставка под образец; 3 – образец с УНТ; 4 – консоль; 5 – крюк динамометра; 6 – динамометр; 7 – панель управления прибором; 8 – экран; 9 – рукоять для регулировки высоты; 10 – место контакта клеевого состава

Fig. 2. Scheme of the stand for measuring adhesion (*a*) and photograph of its fragment (*b*): 1 – installation base; 2 – support for the sample; 3 – sample with CNT; 4 – console; 5 – dynamometer hook; 6 – dynamometer; 7 – instrument control panel; 8 – screen; 9 – height controller; 10 – contact place of the adhesive composition

Для исследования ВАХ использовали специальный измерительный вакуумный стенд. Образцы помещали в вакуумную камеру измерительного стенда, зонды устанавливали на соответствующие контактные площадки. Для получения автоэмиссионных ВАХ использовали анализатор полупроводниковых приборов Keysight B1500A. Электрофизические измерения проводили при комнатной температуре, остаточном давлении не ниже $5 \cdot 10^{-7}$ торр и при приложении постоянного напряжения к аноду до 140 В.

Результаты и их обсуждение. ***Оптимизация процесса синтеза УНТ.*** Ранее исследованы различные сплавы Ct-Me-N-(O) (Ct – металл, катализатор роста УНТ, Me – переходный металл), на которых возможен рост УНТ [17]. Отметим, что исходная пленка сплава Ct-Me-N-(O) является аморфной и не содержит частиц катализатора, необходимых для роста УНТ. Однако при нагреве аморфный сплав Ct-Me-N-(O) кристаллизуется, в результате чего на его поверхности формируются ограненные кристаллические частицы каталитического металла Ct. При этом остальная пленка сплава обедняется Ct. Именно на этих наночастицах растут УНТ. Анализ, проведенный в [16], показал, что более тонкие УНТ растут на частицах Co. Поэтому выбран сплав Co-Nb-N-(O). При реализуемой конструкции электровакуумного диода образовавшаяся после роста УНТ пленка сплава играет роль электрода. Следовательно, она должна иметь достаточно высокую электропроводность.

В ходе предварительных исследований выявлено, что такие металлы, как Ti, Zr, Ta, Cr, V, в процессе формирования пленки сплава и ее последующей термообработки в процессе роста УНТ методом ХОПФ неконтролируемым образом поглощают кислород, что приводит к сильному снижению электропроводности пленки. Аналогичное явление наблюдается и для Nb, но оксид NbO является электропроводящим [18]. Кроме того, при механическом воздействии на массив УНТ, выращенный на сплаве Ni-Nb-N-(O),

обнаружено, что трубки разрушаются, но не отрываются от пленки сплава. Это указывает на очень хороший контакт между УНТ и пленкой сплава, поэтому в качестве Me выбран Nb. В системе Co-Nb образуется набор интерметаллических соединений, поэтому при низком содержании Co в пленке Co-Nb образование наночастиц Co оказывается затруднительным, из-за того что весь Co связан в интерметаллические соединения. В результате введения азота в камеру в процессе магнетронного распыления создаются условия для формирования соединения NbN, которое имеет хорошую электропроводность. Таким образом, это не позволяет Co создавать связи с Nb. В результате Co при кристаллизации по границам зерен диффундирует на поверхность пленки и формирует на ней наночастицы.

Изучение исходной пленки Co-Nb-N-(O) с помощью ПЭМ показало, что она является рентгеноаморфной и ее дифрактограмма имеет вид размытого кольца (гало). Это характерно для аморфных материалов и аналогично результату, наблюдаемому ранее для других сплавов [15]. На рис. 3 представлены результаты ПЭМ-исследования тонкой пленки Co-Nb-N-(O) после нагрева при температуре 650 °C в течение 15 мин, необходимого для реализации процесса ХОПФ-синтеза УНТ. Поведение сплава Co-Nb-N-(O) аналогично поведению других сплавов, подробно описанному в [16]: в процессе термообработки происходит его кристаллизация и диффузия каталитического металла, в данном случае Co, на поверхность с образованием его наночастиц.

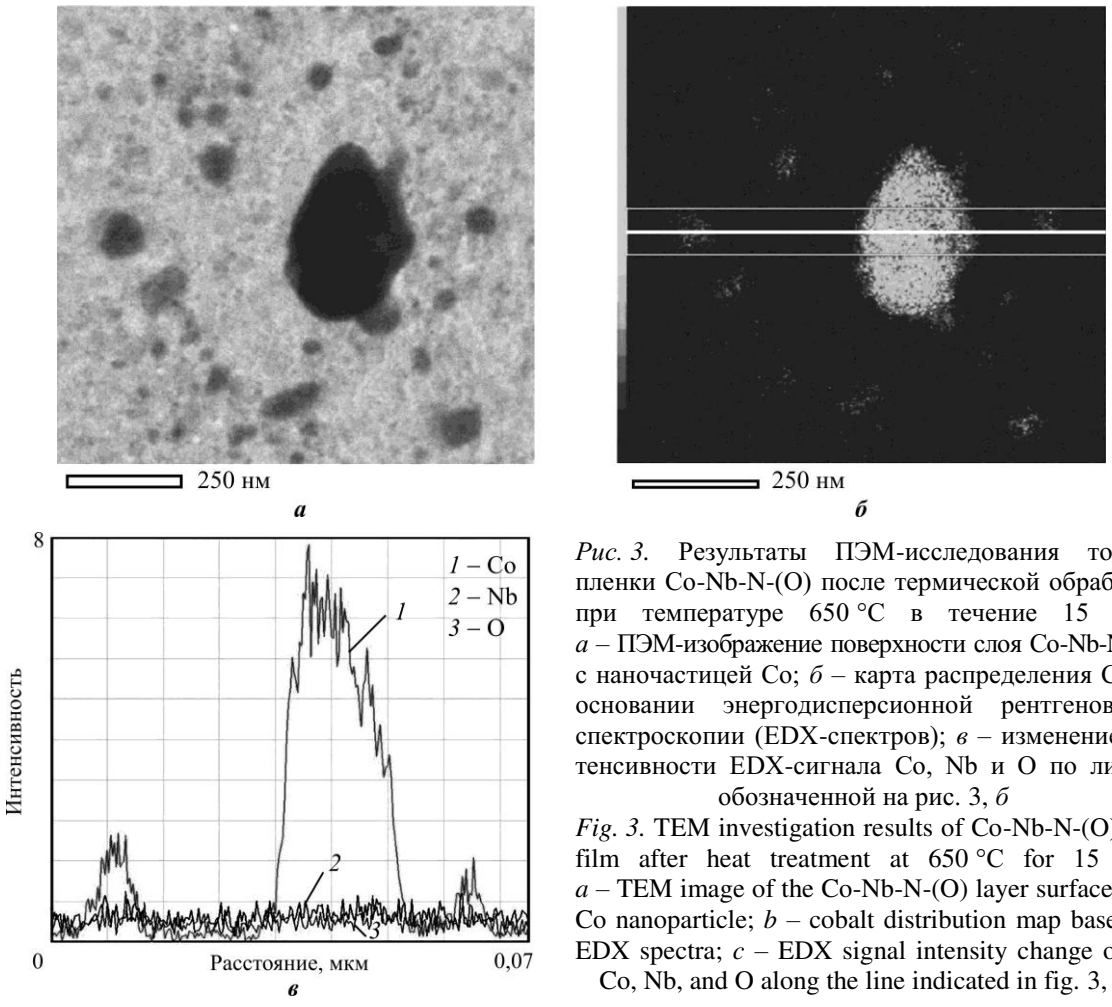


Рис. 3. Результаты ПЭМ-исследования тонкой пленки Co-Nb-N-(O) после термической обработки при температуре 650 °C в течение 15 мин: *а* – ПЭМ-изображение поверхности слоя Co-Nb-N-(O) с наночастицей Co; *б* – карта распределения Co на основании энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX-спектров); *в* – изменение интенсивности EDX-сигнала Co, Nb и O по линии, обозначенной на рис. 3, *б*

Fig. 3. TEM investigation results of Co-Nb-N-(O) thin film after heat treatment at 650 °C for 15 min: *a* – TEM image of the Co-Nb-N-(O) layer surface with Co nanoparticle; *b* – cobalt distribution map based on EDX spectra; *c* – EDX signal intensity change of the Co, Nb, and O along the line indicated in fig. 3, *b*

Проведены исследования по оптимизации процесса синтеза УНТ на пленке сплава Co-Nb-N-(O). Максимально быстрый рост УНТ наблюдается при температуре 650 °C (рис. 4). За 5 мин на сплаве Co-Nb-N-(O) вырастает массив многостенных тонких УНТ высотой почти 26 мкм, диаметр которых в пределах массива, как показали измерения, варьируется от 5 до 12 нм.

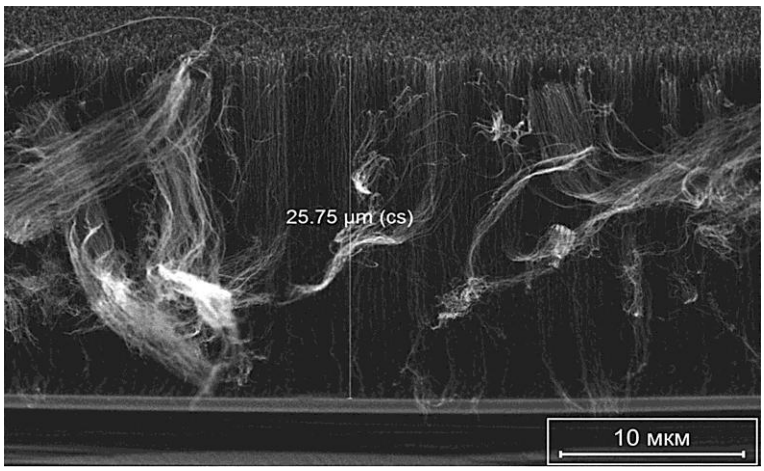


Рис. 4. РЭМ-изображение массива УНТ на пленке Co-Nb-N-(O)
Fig. 4. SEM image of CNTs array on Co-Nb-N-(O) film

Недостатком ХОПФ-синтеза УНТ на поверхности подложки является низкая адгезия УНТ к поверхности, на которой они сформированы. Поэтому полученные образцы с массивами УНТ изучены с целью определения адгезии по описанной методике. Для сравнения измерена адгезия массивов УНТ, выращенных на наночастицах, сформированных классическим образом путем физического осаждения на поверхность. Измерения показали, что адгезия массива УНТ к поверхности была не менее 5,0 МПа. Данное значение выше требования ОСТ4 Г0.054.238 «Микросборки. Платы. Тонкопленочные типовые технологические процессы». При этом исследование оторванных поверхностей показало, что во всех случаях имел место отрыв клея от массива УНТ без разрушения УНТ, а не отрыв массива УНТ от поверхности осаждения. Это указывает на то, что реальное значение адгезии массива УНТ в поверхности сплава Co-Nb-N-(O), на котором они синтезированы, выше измеренного значения. В то же время адгезия УНТ, выращенных классическим образом, составляет только 2,0 МПа.

Интегральная технология формирования автоэмиссионных диодов. Для изготовления тестовых автоэмиссионных диодов реализована планарная интегральная технология по маршруту, представленному на рис. 5. На подложках кремния выращен слой SiO_2 толщиной 0,3 мкм методом термического окисления (рис. 5, *а*). Методом химического осаждения из газовой фазы сформирован слой Si_3N_4 толщиной 170 нм в качестве стоп-слоя (рис. 5, *б*), который необходим при травлении. На диэлектрические слои методом магнетронного распыления нанесена тонкая пленка сплава Co-Nb-N-(O) толщиной 300 нм (рис. 5, *в*). Поверхность Co-Nb-N-(O) покрыта защитным слоем SiO_2 толщиной 1 мкм (рис. 5, *г*). На полученной многослойной структуре методом фотолитографии сформирована фоторезистивная маска (рис. 5, *д*). Полученная структура подвергнута «сухому» травлению ионами аргона, которое контролировали с помощью интегрированного вторично-ионного масс-спектрометра и в процессе которого через фоторезистивную маску протравлены защитный слой SiO_2 и тонкая пленка сплава Co-Nb-N-(O) до стоп-слоя Si_3N_4 (рис. 5, *е*). После этого фоторезистивная маска была уда-

лена жидкостным способом в диметилформамиде и поверхность зачищена от углеродсодержащих продуктов в кислородной плазме (рис. 5, *ж*). На завершающем этапе осуществлен процесс синтеза УНТ. Поскольку открытыми участками каталитического сплава Co-Nb-N-(O) являются только протравленные торцы пленки, а вся остальная поверхность сплава Co-Nb-N-(O) покрыта защитным слоем SiO_2, синтез УНТ происходит локально, только на торцах пленки сплава Co-Nb-N-(O) (рис. 5, *з*). Для измерения эмиссионных характеристик полученных диодов твердая изолирующая маска была удалена с поверхности структуры в разбавленной фтористоводородной кислоте. Затем образцы промывали в деионизованной воде и сушили в атмосфере азота (рис. 5, *и*).

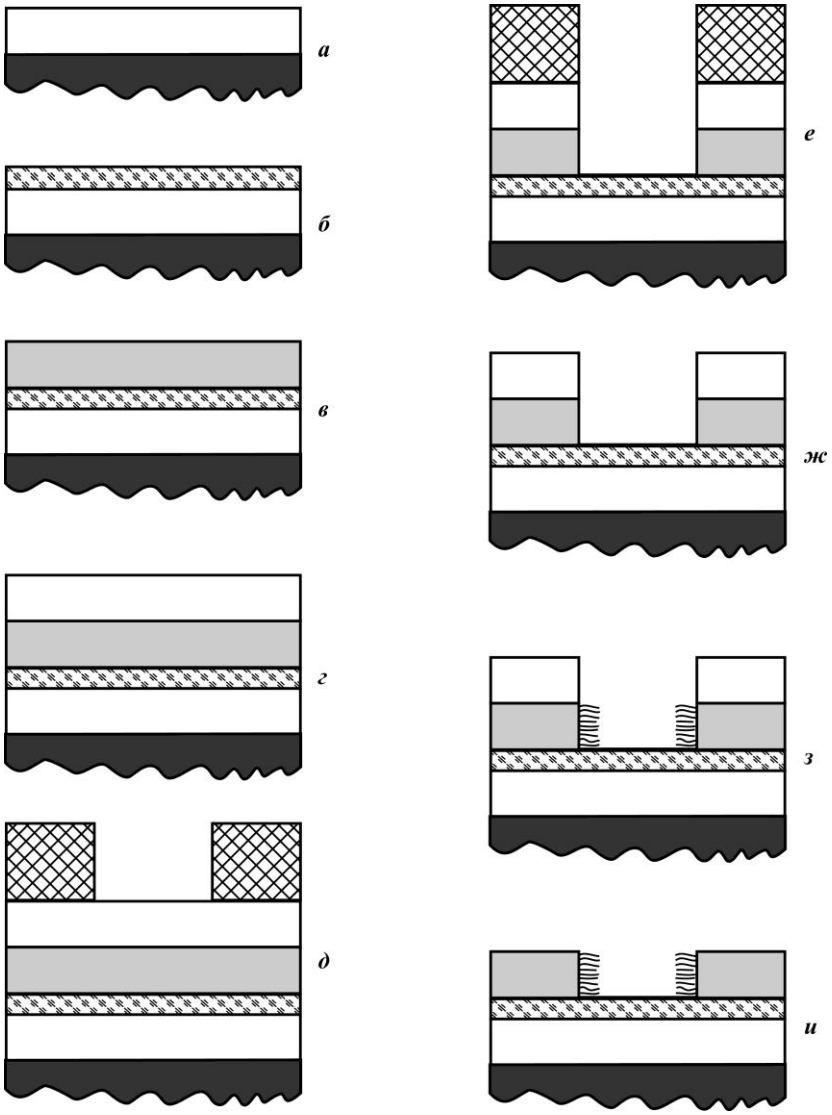
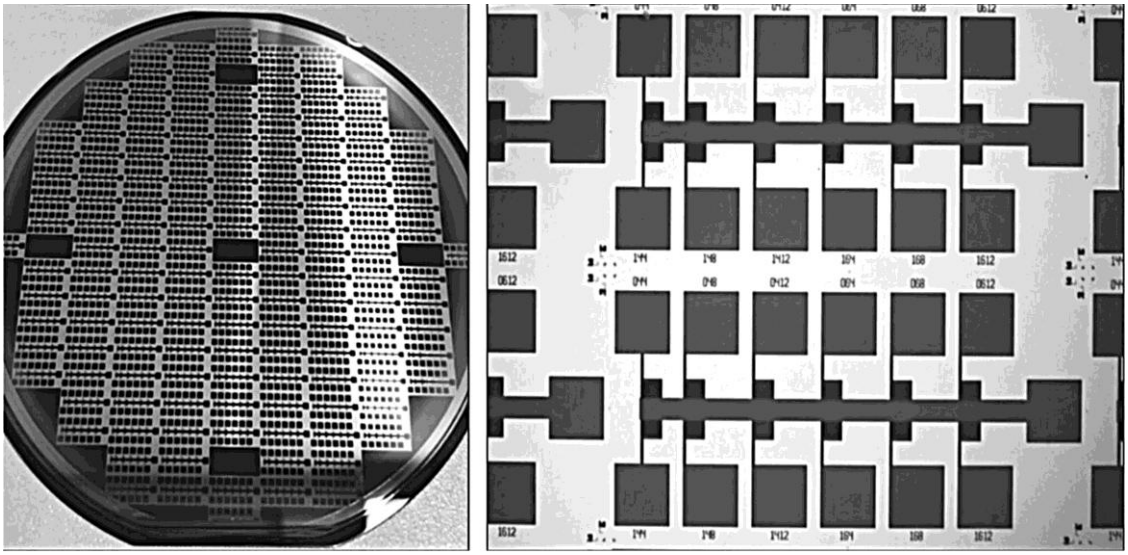


Рис. 5. Маршрут изготовления тестовых планарных автоэмиссионных устройств на основе УНТ: *а* – окисление Si; *б* – осаждение Si_3N_4; *в* – напыление Co-Nb-N-(O); *г* – осаждение SiO_2; *д* – фотолитография; *е* – травление (формирование твердой маски); *ж* – удаление фоторезиста; *з* – синтез УНТ; *и* – удаление твердой маски

Fig. 5. Manufacturing route for test planar field-emission devices based on CNTs: *a* – Si oxidation; *b* – Si_3N_4 deposition; *c* – Co-Nb-N-(O) deposition; *d* – SiO_2 deposition; *e* – photolithography; *f* – etching (hard mask formation); *g* – photoresist removal; *h* – CNT synthesis; *i* – hard mask removal

На рис. 6, *а* показана конечная структура с множеством модулей с диодными структурами на подложке кремния. Подробное изображение одного из них приведено на рис. 6, *б*. Каждый модуль содержит по 12 автоэмиссионных диодов с различными зазорами между катодом и анодом: 2,5; 4; 4,5; 6 мкм. Модуль содержит общую контактную площадку анода и 12 отдельных контактных площадок катодов. На рис. 7 представлено РЭМ-изображение области, на которой хорошо видны массив УНТ, выросших на торце пленки сплава Co-Nb-N-(O), и зазор между катодом и анодом. Данное изображение демонстрирует минимальный литографически полученный зазор, равный 2,5 мкм. После выращивания УНТ между катодом и анодом остался зазор ~ 1 мкм.



а ***б***

Рис. 6. Подложка с тестовыми модулями после проведения процессов травления и осаждения (*а*) и увеличенное изображение тестового модуля (*б*)
Fig. 6. Substrate with test modules after etching and deposition (*a*) and enlarged image of the test module (*b*)

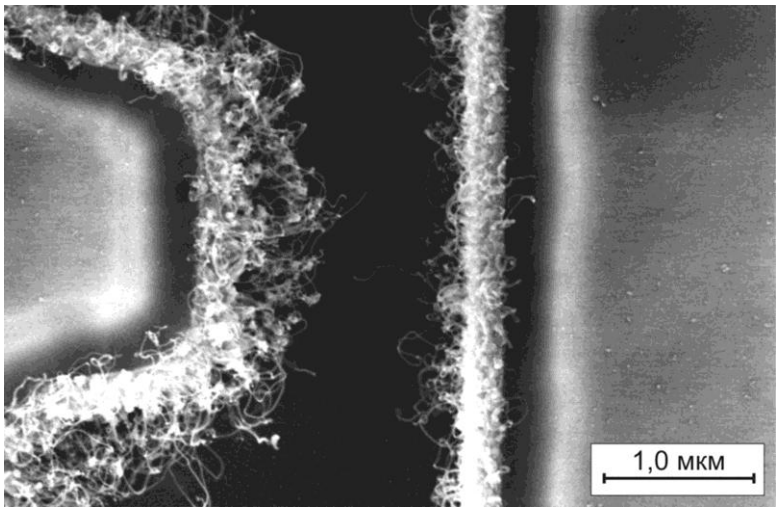


Рис. 7. РЭМ-изображение УНТ на торцах пленки Co-Nb-N-(O)
Fig. 7. SEM image of CNTs at the ends of a Co-Nb-N-(O) film

Исследование ВАХ полученной автоэмиссионной диодной структуры. Работоспособность полученных интегральных планарных электровакуумных диодов подтверждена исследованиями ВАХ приборов. Проведено множество измерений ВАХ изготовленных диодных структур с различным межэлектродным расстоянием. Результаты статистически обработаны. На рис. 8, *а* в качестве примера приведена ВАХ для изготовленных диодов на основе УНТ. Это типичная для диодов прямая ветвь с резко нелинейной, экспоненциальной зависимостью тока от приложенного напряжения. Резкое увеличение тока наблюдается при напряжении выше 100 В.

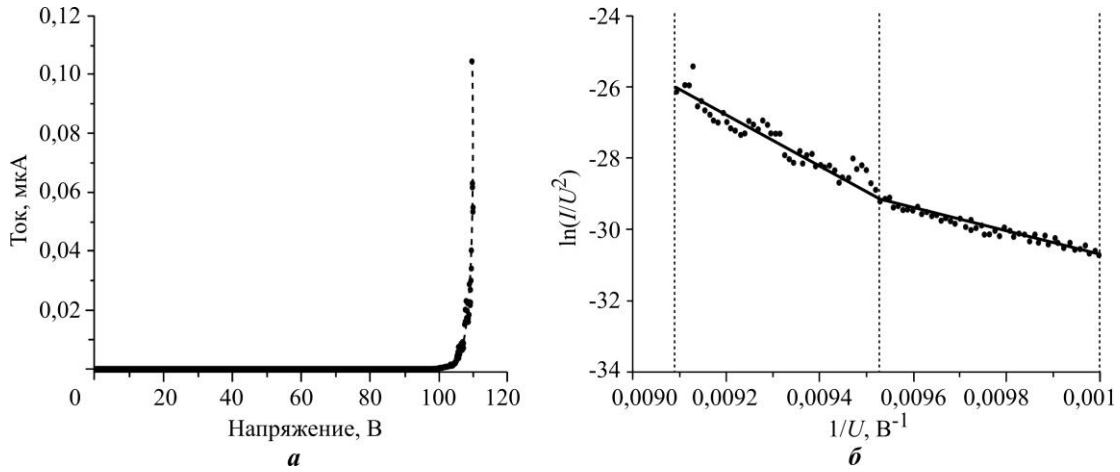


Рис. 8. ВАХ планарного электровакуумного диода на основе УНТ с межэлектродным расстоянием 4,5 мкм (*а*) и та же ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма (*б*)

Fig. 8. I–V characteristics of a planar electrovacuum diode based on CNTs with interelectrode distance of 4.5 μm (*a*) and the same *I–V* characteristics in the Fowler – Nordheim coordinates (*b*)

Типичная ВАХ в диапазоне напряжений 100–110 В линеаризуется в координатах Фаулера – Нордгейма (рис. 8, *б*), при этом на зависимости тока от напряжения существует точка перегиба, соответствующая напряжению ~ 105 В. С учетом факта линеаризации ВАХ в указанных спецкоординатах, а также расстояния между катодом и анодом после выращивания на их торцевых поверхностях массивов УНТ (~ 1 мкм) можно полагать, что в системе реализуется автоэлектронная эмиссия с пороговым напряжением ~ 105 В. С учетом усиления поля вблизи вершин микроострий (по Лапласу) на расстояниях 3–7 диаметров УНТ, т. е. ~ 50 нм, это соответствует пороговому полю автоэлектронной эмиссии ~ $5 \cdot 10^6$ В/см.

Факт электронной эмиссии подтвержден результатом проведенного теста Форбса, который позволяет определить границы диапазона масштабированного барьерного поля f на поверхности эмиттера при определенном напряжении U [19]. Тест Форбса основан на расчете диапазона f_{lower}–f_{upper} по полученным экспериментальным данным для максимального и минимального напряжений в эксперименте с последующим сравнением его с табличными полями [19, 20]. В рассматриваемом случае расчетные значения f_{lower} и f_{upper} составили соответственно 0,15 и 0,18. Согласно предложенной Форбсом модели, данные значения находятся в допустимых границах диапазона параметров f, характерных для вертикально ориентированных массивов УНТ на кремнии (0,14–0,18). Линеаризованный в спецкоординатах участок ВАХ в области напряжений 100–105 В (см. рис. 8, *б*, справа от точки перегиба), исходя из последовательности смены «барьерных» механизмов транспорта носителей на «подбарьерные» при повышении напряже-

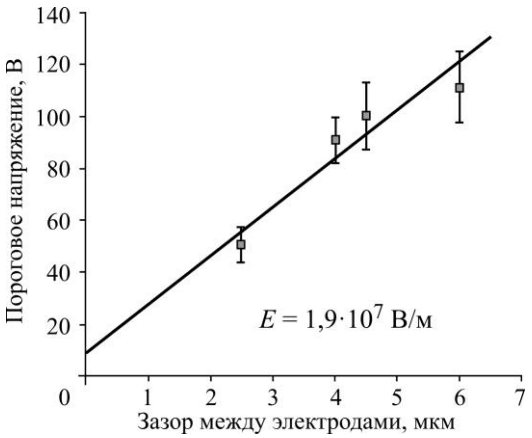


Рис. 9. Зависимость порогового напряжения электровакуумных диодов от зазора между электродами

Fig. 9. Dependence of the threshold voltage of electrovacuum diodes on the size of the gap between the electrodes

ний на электродах вакуумных эмиссионных диодов, является участком термоактивированного туннелирования [21, 22].

На рис. 9 представлена зависимость порогового напряжения электровакуумных диодов от зазора между катодом и анодом, полученная при статистической обработке измерений диодных структур из разных кристаллов, находящихся в различных местах подложки. Здесь под пороговым напряжением принимается значение напряжения, при котором анодный ток достигает 10 нА. Из рисунка видно, что с коэффициентом корреляции 0,93 зависимость линеаризуется с точкой аппроксимации по пороговой напряженности ~ 20 В/мкм. С помощью полученного в результате аппроксимации (методом наименьших квадратов) линейного уравнения определено среднее значение напряженности электрического поля ~ $5 \cdot 10^6$ В/см, что соответствует результатам представленных оценок.

Заключение. Разработанный технологический прием локального синтеза УНТ на торце топологически оформленных областей тонкой пленки сплава Co-Nb-N-(O) встроен в интегральную технологию формирования планарных эмиссионных приборов. С использованием данной технологии изготовлены работоспособные планарные автоэмиссионные диоды. Анализ ВАХ полученных диодов показал, что наблюдаемая зависимость тока от напряжения определяется процессом полевой эмиссии. Вычисленное значение напряженности электрического поля порога эмиссии является характерным для эмиттеров на основе УНТ.

Литература

1. ***Зебрев Г. И.*** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. НИЯУ МИФИ, 2010. 148 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.нано-е.рф/uploads/files/Zebrev_Radiacionnye_effekty.pdf (дата обращения: 07.10.2022).

2. ***Leroy C., Rancoita P.-G.*** Particle interaction and displacement damage in silicon devices operated in radiation environments // Rep. Prog. Phys. 2007. Vol. 70 (4). P. 493–625. https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/4/R01

3. ***Pease R. L.*** Total ionizing dose effects in bipolar devices and circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. Vol. 50. Iss. 3. P. 539–551. https://doi.org/10.1109/TNS.2003.813133

4. Strength of carbon nanotubes depends on their chemical structures / ***A. Takakura, K. Beppu, T. Nishihara et al.*** // Nat. Commun. 2019. Vol. 10. Art. No. 3040. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10959-7

5. On the stability and abundance of single walled carbon nanotubes / ***D. Hedman, H. R. Barzegar, A. Rosén et al.*** // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. Art. No. 16850. https://doi.org/10.1038/srep16850

6. ***Huo C., Liang F., Sun A.*** Review on development of carbon nanotube field emission cathode for space propulsion systems // High Voltage. 2020. Vol. 5. Iss. 4. P. 409–415. https://doi.org/10.1049/hve.2019.0257

7. ***Kawano H.*** Effective work functions for ionic and electronic emissions from mono- and polycrystalline surfaces // Progress in Surface Science. 2008. Vol. 83. Iss. 1-2. P. 1–165. https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2007.11.001

8. Stimulated emission from nitrogen-vacancy centres in diamond / ***J. Jeske, D. W. M. Lau, X. Vidal et al.*** // Nat. Commun. 2017. Vol. 8. Art. No. 14000. https://doi.org/10.1038/ncomms14000

9. ***Gao S. W., Gong X. Z., Liu Y., Zhang Q. Q.*** Energy consumption and carbon emission analysis of natural graphite anode material for lithium batteries // MSF. 2018. Vol. 913. P. 985–990. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.913.985

10. ***Булярский С. В., Басаев А. С.*** Катализаторы роста углеродных нанотрубок. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2015. 124 с.

11. Influence of a buffer layer on the formation of a thin-film nickel catalyst for carbon nanotube synthesis / ***S. V. Bulyarskiy, E. V. Zenova, A. V. Lakalin et al.*** // Tech. Phys. 2018. Vol. 63. P. 1834–1839. https://doi.org/10.1134/S1063784218120253

12. Эмиттеры из углеродных нанотрубок для планарной эмиссионной вакуумной микро- и наноэлектроники / ***С. А. Гаврилов, Э. А. Ильичев, Э. А. Полторацкий и др.*** // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 14. С. 75–81.

13. Латеральный эмиттер как базовый элемент интегральной эмиссионной электроники / ***С. А. Гаврилов, Э. А. Ильичев, А. И. Козлитин и др.*** // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 11. С. 48–53.

14. Пат. 2250526 РФ. Эмиттер для интегральных приборов / ***С. А. Гаврилов, Э. А. Ильичев, Э. А. Полторацкий, Г. С. Рычков***; заявл. 21.07.2003; опубл. 20.04.2005, Бюл. № 11. 9 с.

15. Unidirectional and bi-directional growth of carbon nanotubes on the catalytic Co–Zr–N-(O) material / ***P. Mierczynski, S. Dubkov, K. Vasilev et al.*** // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 12. P. 512–520. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.015

16. Development of techniques for the formation of a planar electric vacuum diode based on an array of CNTs synthesized at the edge of the Co-Nb-N-(O) film / ***G. S. Eritsyan, D. G. Gromov, S. V. Dubkov et al.*** // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2103. Art. ID: 012120. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012120

17. Growth of carbon nanotube arrays on various Ct_xMe_y alloy films by chemical vapour deposition method / ***P. Mierczynski, S. V. Dubkov, S. V. Bulyarskii et al.*** // J. Mater. Sci. Technol. 2018. Vol. 34. Iss. 3. P. 472–480. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.01.030

18. ***Nico C., Monteiro T., Graça M. P. F.*** Niobium oxides and niobates physical properties: Review and prospects // Progress in Materials Science. 2016. Vol. 80. P. 1–37. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.02.001

19. ***Forbes R. G.*** Development of simple quantitative test for lack of field emission orthodoxy // Proc. R. Soc. A. 2013. Vol. 469. Iss. 2158. Art. ID: 20130271. https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0271

20. ***Попов Е. О., Колосько А. Г., Филиппов С. В.*** Тест на соответствие режиму холодной полевой эмиссии с применением приближений Элинсона – Шредника и Форбса – Дина (координаты Мерфи – Гуда) // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 17 (173). С. 6–9. https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.17.49884.18373

21. ***Келдыш Л. В.*** О влиянии колебаний решетки кристалла на рождение электронно-дырочных пар в сильном электрическом поле // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. № 4. С. 962–967.

22. Частотная дисперсия крутизны в полевых транзисторах на основе δ-легированных структур / ***В. А. Гергель, Э. А. Ильичев, Э. А. Полторацкий и др.*** // ФТП. 1991. Т. 25. Вып. 11. С. 1870–1876.

Статья поступила в редакцию 16.09.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.09.2022 г.;
принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Громов Дмитрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), старший научный сотрудник Первого Московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова Минздрава России (Россия, 119435, г. Москва, ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4), gromadima@gmail.com

Ерицян Георгий Спартакович – аспирант, младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gosha22_07@mail.ru

Кицюк Евгений Павлович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), kitsyuk.e@gmail.com

Савицкий Андрей Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), andr.savitskiy@gmail.com

Скорик Сергей Николаевич – ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), nilpp@yandex.ru

Дубков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sv.dubkov@gmail.com

Гринаковский Егор Денисович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-технолог опытного производства НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), theretribution25@gmail.com

Булярский Сергей Викторович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), bulyar2954@mail.ru

Дудин Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, начальник отдела структурного анализа и метрологии Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), dudin.a@inme-ras.ru

Волкова Лидия Сергеевна – младший научный сотрудник отдела структурного анализа и метрологии Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), lidiya.volkova.96@mail.ru

Еганова Елена Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела микро- и наноэлектроники и биосенсорики Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), eganovaem@mail.ru

Трифонов Алексей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), начальник лаборатории физико-аналитических исследований Научно-исследовательского института физических проблем имени Ф. В. Лукина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5), trif123456@yandex.ru

Поляков Максим Викторович – младший научный сотрудник отдела структурного анализа и метрологии Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), maxsimpolykovv@gmail.com

Орлов Андрей Петрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела структурного анализа и метрологии Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), andreyorlov@mail.ru

Рудаков Григорий Александрович – научный сотрудник отдела разработок и исследований микро- и наносистем Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), rudakov.g@inme-ras.ru

Светухин Вячеслав Викторович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), svetukhin@mail.ru

References

1. Zebrev G. *Radiation effects in silicon high scaled integrated circuits.* MEPhi, 2010. 148 p. (In Russian). http://doi.org/10.13140/2.1.1278.9442

2. Leroy C., Rancoita P.-G. Particle interaction and displacement damage in silicon devices operated in radiation environments. *Rep. Prog. Phys.,* 2007, vol. 70 (4), pp. 493–625. https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/4/R01

3. Pease R. L. Total ionizing dose effects in bipolar devices and circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2003, vol. 50, iss. 3, pp. 539–551. https://doi.org/10.1109/TNS.2003.813133

4. Takakura A., Beppu K., Nishihara T., Fukui A., Kozeki T., Namazu T., Miyauchi Y., Itami K. Strength of carbon nanotubes depends on their chemical structures. *Nat. Commun.,* 2019, vol. 10, art. no. 3040. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10959-7

5. Hedman D., Barzegar H. R., Rosén A., Wågberg Th., Larsson J. A. On the stability and abundance of single walled carbon nanotubes. *Sci. Rep.,* 2015, vol. 5, art. no. 16850. https://doi.org/10.1038/srep16850

6. Huo C., Liang F., Sun A. Review on development of carbon nanotube field emission cathode for space propulsion systems. *High Voltage*, 2020, vol. 5, iss. 4, pp. 409–415. https://doi.org/10.1049/hve.2019.0257

7. Kawano H. Effective work functions for ionic and electronic emissions from mono- and polycrystalline surfaces. *Progress in Surface Science*, 2008, vol. 83, iss. 1-2, pp. 1–165. https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2007.11.001

8. Jeske J., Lau D. W. M., Vidal X., McGuinness L. P., Reineck Ph., Johnson B. C., Doherty M. W., McCallum J. C. et al. Stimulated emission from nitrogen-vacancy centres in diamond. *Nat. Commun.,* 2017, vol. 8, art. no. 14000. https://doi.org/10.1038/ncomms14000

9. Gao S. W., Gong X. Z., Liu Y., Zhang Q. Q. Energy consumption and carbon emission analysis of natural graphite anode material for lithium batteries. *MSF,* 2018, vol. 913, pp. 985–990. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.913.985

10. Bulyarskiy S. V., Basaev A. S. *Carbon nanotube growth catalysts.* Saarbrücken, LAMBERT Academic Publishing, 2015. 124 p. (In Russian).

11. Bulyarskiy S. V., Zenova E. V., Lakalin A. V., Molodenskii M. S., Pavlov A. A., Tagachenkov A. M., Terent'ev A. V. Influence of a buffer layer on the formation of a thin-film nickel catalyst for carbon nanotube synthesis. *Tech. Phys.,* 2018, vol. 63, pp. 1834–1839. https://doi.org/10.1134/S1063784218120253

12. Gavrilov S. A., Il'ichev Eh. A., Poltoratskij Eh. A., Rychkov G. S., Dvorkin V. V., Dzbanovskiy N. N., Suetin N. V. Emitters from carbon nanotubes for planar emission vacuum micro- and nanoelectronics. *Pis'ma v ZhTF = JTP Letters,* 2004, vol. 30, no. 14, pp. 75–81. (In Russian).

13. Gavrilov S. A., Il'ichev Eh. A., Kozlitin A. I., Poltoratskij Eh. A., Rychkov G. S., Dzbanovskiy N. N., Dvorkin V. V., Suetin N. V. Lateral emitter as a basic element of integrated emission electronics. *Pis'ma v ZhTF = JTP Letters,* 2004, vol. 30, no. 11, pp. 48–53. (In Russian).

14. Gavrilov S. A., Il'ichev Eh. A., Poltoratskij Eh. A., Rychkov G. S. *Emitter for integrated device.* Patent 2250526 RF, publ. 20.04.2005, Bul. no. 11. 9 p. (In Russian).

15. Mierczynski P., Dubkov S., Vasilev K., Maniecki T., Kitsyuk E., Yeritsyan G., Szynkowska M. I., Trifonov A., Gavrilov S., Gromov D. Unidirectional and bi-directional growth of carbon nanotubes on the catalytic Co–Zr–N-(O) material. *Journal of Materials Research and Technology,* 2021, vol. 12, pp. 512–520. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.015

16. Eritsyan G. S., Gromov D. G., Dubkov S. V., Kitsyuk E. P., Savitskiy A. I., Dudin A. A. Development of techniques for the formation of a planar electric vacuum diode based on an array of CNTs synthesized at the

edge of the Co-Nb-N-(O) film. *J. Phys.: Conf. Ser.,* 2021, vol. 2103, art. ID: 012120. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012120

17. Mierczynski P., Dubkov S. V., Bulyarskii S. V., Pavlov A. A., Skorik S. N., Trifonov A. Yu., Mierczynska A., Kitsyuk E. P., Gavrilov S. A., Maniecki T. P., Gromov D. G. Growth of carbon nanotube arrays on various Ct_xMe_y alloy films by chemical vapour deposition method. *J. Mater. Sci. Technol.,* 2018, vol. 34, iss. 3, pp. 472–480. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.01.030

18. Nico C., Monteiro T., Graça M. P. F. Niobium oxides and niobates physical properties: Review and prospects. *Progress in Materials Science,* 2016, vol. 80, pp. 1–37. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.02.001

19. Forbes R. G. Development of simple quantitative test for lack of field emission orthodoxy. *Proc. R. Soc. A,* 2013, vol. 469, iss. 2158, art. ID: 20130271. https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0271

20. Popov E. O., Kolosko A. G., Filippov S. V. A test for compliance with the cold field emission regime using the Elinson – Schrednik and Forbes – Deane approximations (Murphy – Good plot). *Tech. Phys. Lett.,* 2020, vol. 46, pp. 838–842. https://doi.org/10.1134/S1063785020090096

21. Keldysh L. V. On the effect of crystal lattice vibrations on the generation of electron-hole pairs in a strong electric field. *JETP,* 1958, vol. 34, no. 4, pp. 962–967. (In Russian).

22. Gergel' V. A., Il'ichev Eh. A., Poltoratskij Eh. A., Rodionov A. V., Tarnavskiy S. P., Fedorenko A. V. Frequency dispersion of steepness in field-effect transistors based on δ-doped structures. *FTP = Physics and Technics of Semiconductors,* 1991, vol. 25, no. 11, pp. 1870–1876. (In Russian).

The article was submitted 16.09.2022; approved after reviewing 21.09.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Dmitry G. Gromov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Senior Scientific Researcher, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Russia, 119435, Moscow Bolshaya Pirogovskaya st., 2, bld. 4), gromadima@gmail.com

Georgiy S. Eritsyan – PhD student, Junior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gosha22_07@mail.ru

Evgeny P. Kitsyuk – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), kitsyuk.e@gmail.com

Andrey I. Savitskiy – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Junior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), andr.savitskiy@gmail.com

Sergey N. Skorik – Senior Engineer of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), nilpp@yandex.ru

Sergey V. Dubkov – 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), sv.dubkov@gmail.com

Egor D. Grinakovskiy – PhD student, Junior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Process Engineer of Pilot Production, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), theretribution25@gmail.com

Sergey V. Bulyarskiy – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), bulyar2954@mail.ru

Aleksander A. Dudin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Structural Analysis and Metrology Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), dudin.a@inme-ras.ru

Lidiya S. Volkova – Junior Scientific Researcher of the Structural Analysis and Metrology Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), lidiya.volkova.96@mail.ru

Elena M. Eganova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Micro- and Nanoelectronics and Biosensorics Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), eganovaem@mail.ru

Alexey Yu. Trifonov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Head of the Laboratory of Physical and Analytical Research, Scientific Research Institute of Physical Problems named after F. V. Lukin of the National Research Centre "Kurchatov Institute" (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5), trif123456@yandex.ru

Maksim V. Poliakov – Junior Scientific Researcher of the Structural Analysis and Metrology Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), maxsimpolykovv@gmail.com

Andrey P. Orlov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Structural Analysis and Metrology Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), andreyorlov@mail.ru

Grigory A. Rudakov – Researcher of the Development and Research of Micro- and Nanosystems Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), rudakov.g@inme-ras.ru

Vyacheslav V. Svetukhin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), svetukhin@mail.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Научная статья
УДК 621.3.049.774.2-027.31:621.375
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-740-752

Разработка прототипа микросхемы малошумящего усилителя для приемного тракта NB-IoT-системы

***Е. Ю. Котляров*[1,2], *М. Г. Путря*[2], *В. Ю. Михайлов*[1], *И. А. Зубов*[1], *Е. С. Васильев*[1]**

[1]*АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», г. Москва, Россия*
[2]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

ekotlyarov@niime.ru

Аннотация. При проектировании NB-IoT-системы (Narrow Band Internet of Things) основными задачами являются определение граничных параметров узлов системы, а также проверка ее работоспособности в различных условиях. Средства автоматического проектирования позволяют достичь достоверных результатов еще на этапе моделирования, что способствует ускорению разработки и внедрению новых технологий микроэлектронной отрасли, в том числе и индустриального Интернета вещей. В работе представлены аспекты проектирования NB-IoT-системы. Проведены аналитические расчеты приемного тракта с помощью отладочной системы в контексте распространения радиоволн в закрытом пространстве в соответствии со спецификациями стандарта 5G 3GPP. На основе результатов аналитических расчетов по распространению сигнала в замкнутом пространстве для прототипа абонентского устройства сформулированы общие требования к разработке активного узла малошумящего усилителя приемного тракта NB-IoT-приемопередатчика. Исходя из требований и проектных норм 180-нм КМОП технологического процесса, разработан прототип малошумящего усилителя для работы в составе NB-IoT приемопередающего устройства абонентского терминала. Прототип малошумящего усилителя разработан в трехкаскадном исполнении и имеет коэффициент шума 1,7 дБ в частотном диапазоне n7 при коэффициенте усиления 25 дБ. Цифровые КМОП-библиотеки адаптированы для унификации и снижения стоимости процесса разработки аналоговых узлов приемопередающего тракта, в данном случае малошумящего усилителя.

Ключевые слова: Интернет вещей, NB-IoT, 5G, LTE, КМОП, малошумящий усилитель, МШУ

© Е. Ю. Котляров, М. Г. Путря, В. Ю. Михайлов, И. А. Зубов, Е. С. Васильев, 2022

Для цитирования: Разработка прототипа микросхемы малошумящего усилителя для приемного тракта NB-IoT-системы / Е. Ю. Котляров, М. Г. Путря, В. Ю. Михайлов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 740–752. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-740-752

Original article

CMOS 0.18 μm low-noise amplifier concept design for NB-IoT receive path

E. Yu. Kotlyarov[1,2], M. G. Putrya[2], V. Yu. Mikhailov[1], I. A. Zubov[1], E. S. Vasilyev[1]

[1] *"Research Institute of Molecular Electronics" JSC, Moscow, Russia*
[2] *National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

ekotlyarov@niime.ru

Abstract. The main tasks in the Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) system design are definition of system nodes' boundary parameters and system functionality test under different conditions. CAD facilities make it possible to obtain consistent results as early as at the stage of simulation that contributes to development and implementation of new technologies in microelectronics, among others of Industrial Internet of Things. In this work, the aspects of a NB-IoT system design are presented. In the setting of radio wave propagation in an enclosed area, analytical calculations of the receive path were performed using a debugging module in compliance with the 3GPP 5G guidelines. Based on the results of analytical calculations on signal propagation in a closed space for user equipment prototype, general requirements for the development of an active node of a low-noise amplifier for the receive path of an NB-IoT transceiver have been formulated. Based on 0.18 μm CMOS manufacturing specifications and design guidelines, a prototype low-noise amplifier (LNA) was designed to work as part of the user equipment's NB-IoT transceiver. The three-stage LNA prototype has a noise figure of 1.7 dB in the n7 frequency range and a gain of 25 dB. Digital CMOS libraries have been adapted to unify and reduce the cost of the receive path's analog nodes development, in this case, of a LNA.

Keywords: internet of things, NB-IoT, 5G, LTE, CMOS, low-noise amplifier, LNA

For citation: Kotlyarov E. Yu., Putrya M. G., Mikhailov V. Yu., Zubov I. A., Vasilyev E. S. CMOS 0.18 μm low-noise amplifier concept design for NB-IoT receive path. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 740–752. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-740-752

Введение. Развитие средств автоматического проектирования, позволяющих достичь достоверных результатов еще на этапе моделирования, способствует ускорению разработки и внедрению новых технологий микроэлектронной отрасли [1], в том числе и индустриального Интернета вещей [2, 3]. Одной из задач при проектировании NB-IoT-системы (Narrow Band Internet of Things) является определение граничных параметров узлов системы и проверка ее работоспособности в различных условиях. Например, один из критичных параметров – коэффициент усиления приемного радиотракта. Если абонентское устройство находится в помещении неподвижно, то условия

распространения радиоволн можно считать квазипостоянными. Следовательно, необходимость в непрерывном функционировании системы автоматической регулировки усиления отсутствует. Поэтому при разработке прототипа абонентского терминала используется многофункциональное приемо-передающее устройство для прототипирования перспективных систем связи, позволяющее регулировать усиление приемного тракта в ручном режиме и в режиме автоматической регулировки усиления.

Чувствительность – ключевой параметр приемного устройства, на который необходимо обратить внимание на этапе прототипирования. Для повышения чувствительности следует использовать входной каскад с низким уровнем шума, основным узлом которого является малошумящий усилитель (МШУ). При проектировании входного каскада необходимо оценить, какой минимальный уровень мощности сигнала ожидается на входе приемного устройства. Минимальный уровень мощности сигнала можно определить путем моделирования распространения радиоволн в различных условиях.

В настоящей работе проводится расчет ожидаемого уровня мощности сигнала на входе прототипа приемного устройства абонентского терминала, работающего по стандарту NB-IoT.

Оценка уровня принимаемого сигнала. В стандарте 5G приведены рекомендации по моделированию ослабления сигнала в зависимости от типа сценария развертывания сети [4]. Для сценария развертывания сети NB-IoT в рамках 5G внутри помещения предусмотрены две модели: завод (Indoor-Factory) и дом (Indoor-Home).

На рис. 1 приведены графики потерь сигнала от расстояния для моделей сценария Indoor-Factory в частотном диапазоне n7 (2620–2690 МГц). Данный диапазон выбран в соответствии со спецификациями TS 38.104 [5], TS 36.104 [6] и решением ГКРЧ 17-44-06 [7] как диапазон с наивысшей частотой, используемый при организации системы связи и работающий по стандарту NB-IoT. Для частотного диапазона n7 ослабление сигнала не превышает заявленных в стандарте 164 дБ, что говорит о наличии энергетического запаса в радиоканале.

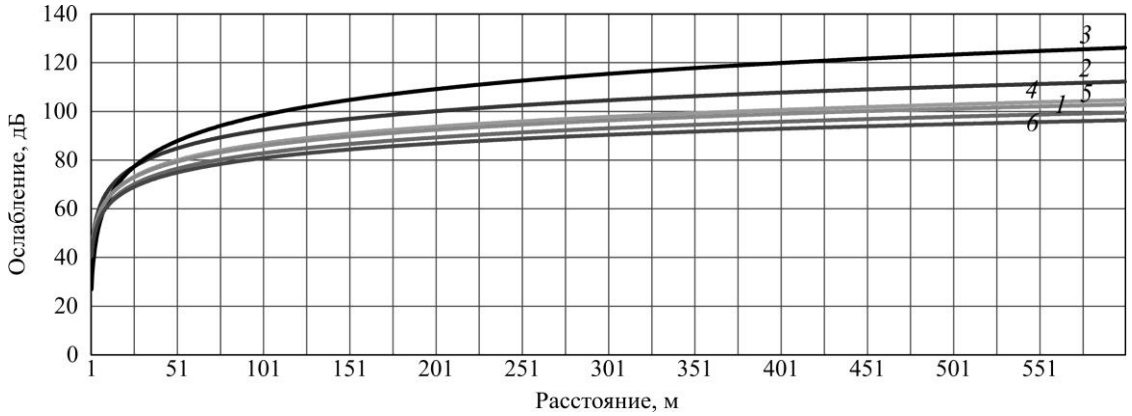


Рис. 1. Ослабление уровня сигнала для сценариев Indoor-Factory в соответствии с TR 38.901 в частотном диапазоне n7: *1* – InF_LoS; *2* – InF_SL; *3* – InF_DL; *4* – InF_SH; *5* – InF_DH; *6* – свободное пространство
Fig. 1. Signal attenuation of the for Indoor-Factory scenarios in accordance with TR 38.901 for the frequency range n7: *1* – InF_LoS; *2* – InF_SL; *3* – InF_DL; *4* – InF_SH; *5* – InF_DH; *6* – free space

Так как мощность базовой станции 5G ограничена 24 дБм [5], то в связи с потерями ожидаемый уровень мощности входного сигнала с учетом модели распространения радиоволн Indoor-Factory на расстоянии 600 м составит –102,1 дБм. Это на 6 дБ больше чувствительности, заявленной в [8].

В зависимости от ожидаемого уровня входного сигнала и при использовании в абонентском терминале униполярного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с разрешением 8 бит с уровнем опорного сигнала 1 В суммарный коэффициент усиления приемного радиотракта должен находиться в диапазоне 20–109 дБ [9]. Такой коэффициент усиления позволит принимать сигналы на расстоянии до 600 м с учетом параметров, приведенных в технических спецификациях 3GPP, и модели распространения радиоволн.

Требования к малошумящему усилителю. По результатам моделирования сформулированы требования к приемо-передающему устройству, которое разрабатывается на базе прототипа. В составе устройства предполагается использовать одно или несколько МШУ (многодиапазонное приемо-передающее устройство) со следующими характеристиками: коэффициент шума не более 4,5 дБ; коэффициент усиления не менее 10 дБ; точка компрессии P1дБ не менее –1 дБм; диапазон частот 400 МГц–5 ГГц. В рамках построения NB-IoT-системы в интегральном исполнении, состоящей из множества узлов [9], осуществляющих преобразование, формирование и обработку ВЧ-сигнала, для уменьшения себестоимости приемо-передающего модуля наилучшим выбором будет использование технологических процессов на основе кремния. Такие технологические процессы дают возможность размещать цифровую и аналоговую ВЧ-части модуля на одном кристалле при невысокой стоимости производства [10, 11].

МШУ является активным узлом приемного тракта системы. Он находится на выходе антенны и фильтра преселектора, который задает рабочую полосу. Функциональное назначение МШУ – усиление малых уровней принимаемого сигнала с минимальными искажениями сигнала (IP2, IP3) и минимально возможным уровнем шума (Noise Figure) для сохранения заданного в рамках системы отношения сигнал / шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Для успешного детектирования и интерпретации отношения сигнал / шум сила сигнала (Signal Strength) должна значительно превышать границу шума (Noise Floor). Достижение минимального уровня шума приемника возможно при соблюдении согласования входных цепей МШУ, а также в результате минимизации вносимого уровня шума первым (входным) каскадом усиления.

При использовании стандартных КМОП-техпроцессов для разработки ИС можно выделить некоторые факторы, налагающие основные ограничения для достижения требуемых параметров в радиочастотных диапазонах:

– низкие значения диэлектрической проницаемости оксидов и толщина проводников не позволяют достичь высокой добротности резонансных цепей проводников, что особенно критично для элементов дегенерации шума – катушек индуктивности. Это в целом сказывается на росте шумовых характеристик и ухудшении нелинейных параметров устройств, и, как следствие, снижается КПД. Также данный фактор сопряжен со снижением резонансных частот катушек индуктивности, характеризующих рабочие полосы резонаторов;

– требуется значительная площадь для достижения высоких значений индуктивности при сохранении приемлемой добротности катушек, с увеличением площади снижается частота саморезонанса, возрастает сопротивление;

– малые толщины проводников препятствуют распространению сигнала на частотах дециметрового и нижней части сантиметрового диапазонов волн вследствие эффекта скин-слоя металлизации (Skin Depth), а также ведут к росту сопротивления, сказывающегося на ослаблении проходящего сигнала, и, как следствие, к росту шума;

– требования к высокой плотности проводников на единицу площади приводят к появлению паразитных емкостных связей.

Разработка малошумящего усилителя. В рамках разработки приемопередатчика подготовлены проекты нескольких узлов для прототипирования NB-IoT-системы на основе КМОП-процесса с проектной нормой 180 нм. Выбор базовой технологии обусловлен несколькими критериями.

Во-первых, это принципиальная возможность построения системы на кристалле смешанного типа, включающей в себя аналоговые ВЧ- и НЧ-блоки, а также цифровую логику. Во-вторых, это возможность локализации производства и запуск прототипов на отечественных фабриках. В-третьих, немаловажным фактором является цена конечного изделия. Таким образом, разработка прототипов узлов проведена на базе технологии HCMOS8D. Данная библиотека предназначена преимущественно для разработки цифровых устройств и не позиционируется как инструмент для реализации высокочастотных проектов, но при добавлении необходимых элементов планарного тракта допускается возможность реализации комплексных высокочастотных устройств, таких как приемопередатчики.

Для построения блока малошумящего усилителя выбран *n*-МОП-транзистор nmos1,8 с малыми токами утечки, толщиной окисла 3,2 нм и напряжением 1,8 В. ВАХ транзистора шириной затвора 670 мкм и длиной 200 нм представлена на рис. 2.

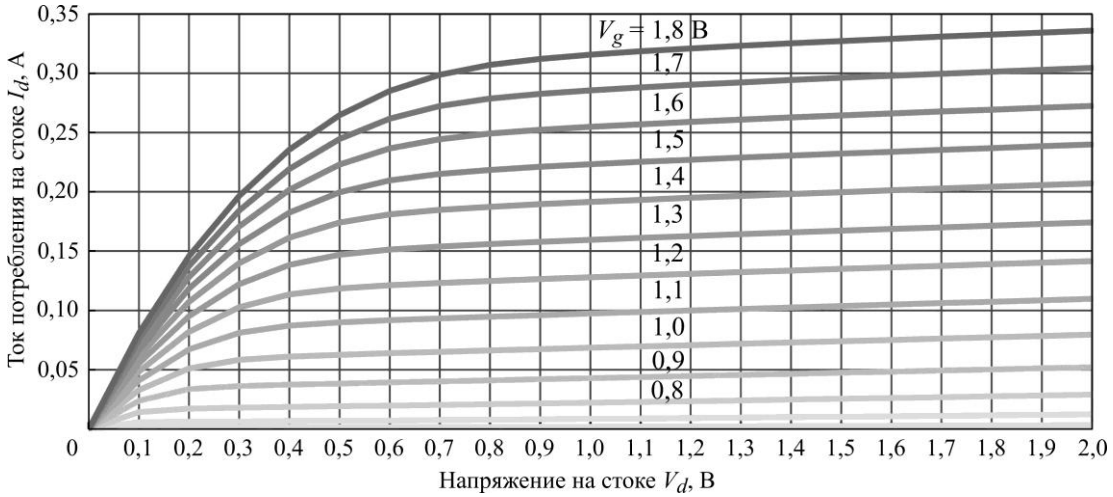


Рис. 2. ВАХ *n*-МОП-транзистора nmos1,8
Fig. 2. nmos1.8 IV chart

Частотные свойства полевых транзисторов характеризуются их быстродействием. Для анализа частотных свойств транзистора используются количественные меры оценки слабосигнальной модели транзистора: граничная F_t и максимальная $F_{\max}$ частоты. На граничной частоте транзистора коэффициент усиления транзистора становится равным единице (K = 1,0 дБ). Граничная частота проявляется на высоких частотах и объясняется влиянием паразитных реактивностей (емкостей) транзистора, а также особенностями полупроводниковой структуры (подвижностью носителей заряда, барьерной емкостью и др.). Для слабосигнальной модели транзистора вычислить граничную частоту можно из проходной функции матрицы рассеяния Н-параметров – $H21$. Максимальная частота характеризуется точкой, где усиление Мэйсона стремится к единице (K = 1, $U_{F\max}$ = 0 дБ), и определяется проходным выражением матрицы рассеяния $S21$. Потенциальная возможность построения высокочастотных схем на основе данного транзистора зависит от граничной и максимальной частот его работы. Например, область рабочих частот предполагаемого устройства должна находиться на отрезке, вдвое-втрое меньшем гранич-

ной частоты (0,5–5 ГГц применительно для систем семейства 5G FR1), с единичным усилением (0 дБ). Граничная и максимальная частоты для выбранного транзистора при питании затвора V_g = 0,9 В и стока V_d = 0,9 В приведены как функции из массива матрицы рассеяния на рис. 3.

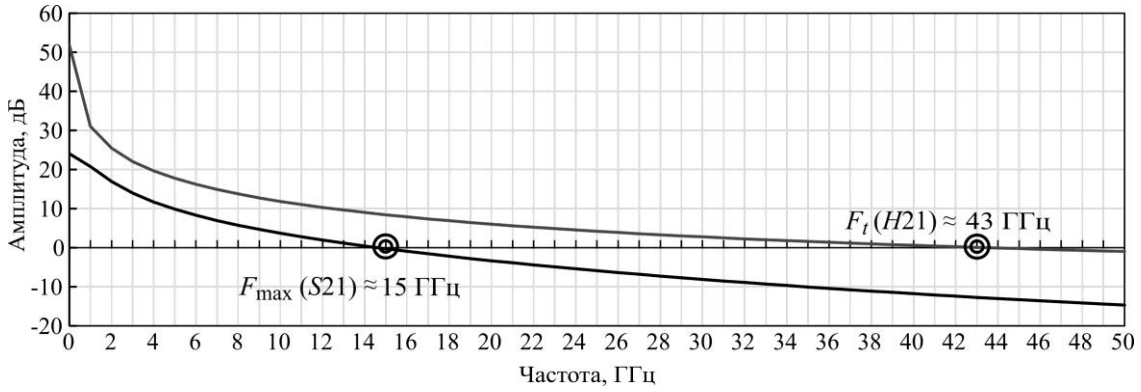


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика *n*-МОП-транзистора
Fig. 3. Frequency response of the nmos1.8

На основе полученных данных разработана схема с минимальным уровнем шума, высокой линейностью для диапазона n7 и максимально возможным уровнем выходной компрессии, что будет востребовано в ряде случаев.

Приведем сводные параметры микросхемы малошумящего усилителя:

Параметр	***Номинальное значение***
Рабочий диапазон частот (–10 дБ *S*11 и *S*22)	1,8–5 ГГц
Коэффициент усиления в диапазоне n7	25,5 дБ
Коэффициент шума в диапазоне n7	1,7 дБ
Коэффициент отражения по входу в диапазоне n7	более 25 дБ
Коэффициент отражения по выходу в диапазоне n7	более 30 дБ
Уровень компрессии по уровню 1 дБ для диапазона n7 (P1dB)	6,69 дБм
Интермодуляционные искажения 2-го и 3-го порядка для диапазона n7:	
– по выходу (OIP3)	39,13 дБм
– по входу (IIP3)	13,91 дБм
– по выходу (OIP3)	27,63 дБм
– по входу (IIP3)	1,03 дБм
Напряжение питания:	
– по затвору V_g	0,9 ± 0,1 В
– по стокам V_d	0,9 ± 0,1 В
Ток потребления микросхемы	90 мА
Габариты микросхемы	1,19×1,43 мм

В соответствии с расчетами, проведенными в работе [9], оптимальный уровень усиления схемы МШУ должен составлять 17 дБ. Транзисторы, отобранные в рамках процесса HCMOS8D, в выбранной конфигурации позволяют достичь в среднем ≈8,5 дБ усиления на каскад. Соответственно, для получения необходимого уровня усиления требуется построение схемы не менее чем с двумя каскадами усиления. Для компенсации ослабления в цепях согласования выйти на требуемое усиление ($G \geq 17$ дБ) на двухкаскадной схеме нет возможности. Следовательно, необходимо увеличить число каскадов усилителя до трех. На рис. 4 представлена схема линейного малошумящего усилителя А-класса на основе трех каскадов.

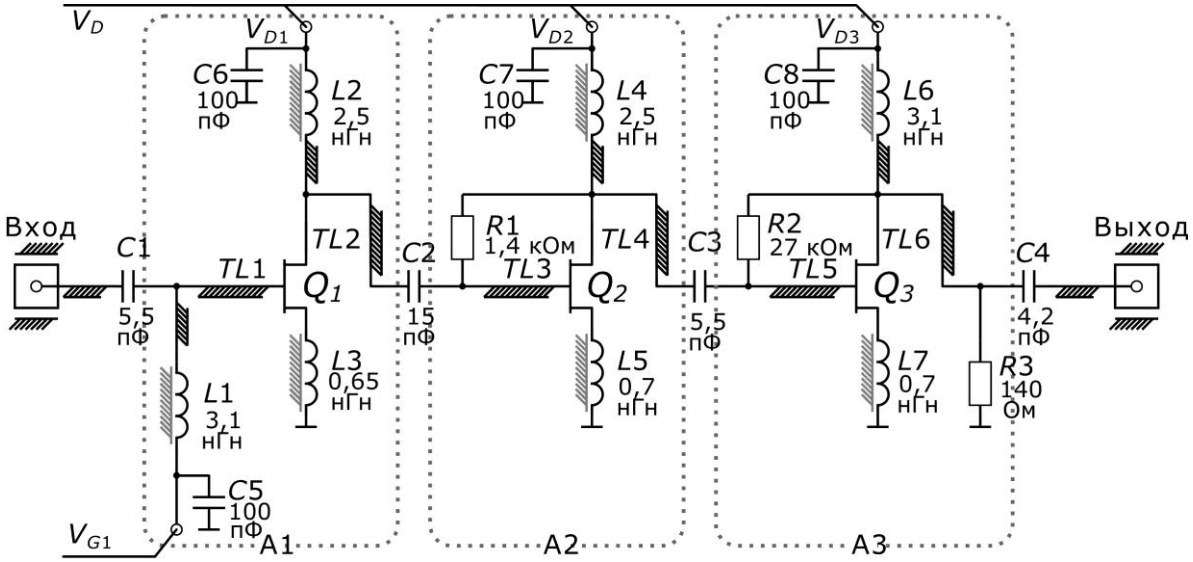


Рис. 4. Схема трехкаскадного малошумящего усилителя S-диапазона частот
Fig. 4. Scheme of a three-stage low-noise S-band amplifier

Конструкция первого каскада выполнена по схеме включения с общим истоком (Common Source) для получения большого усиления, дегенерация шума выполнена с помощью катушки *L*3. Внешнее питание затвора первого каскада через катушку индуктивности *L*1 позволяет смещать рабочую точку для подсогласования входных цепей, в результате чего можно варьировать усиление и шум входного каскада и всего устройства в целом. Второй и третий каскады схемы имеют цепи обратной связи посредством большого сопротивления *R*1 и *R*2. Это позволяет сэкономить площадь кристалла в результате отказа от необходимости дискретного питания по затвору, а также улучшить согласование, что положительно скажется на росте коэффициента стабильности, несмотря на ввод цепи обратной связи. Резистор *R*3 на выходе определяет выходной импеданс из-за несущественного снижения усиления сигнала. Конденсаторы *C*1–*C*4 выполняют функцию гальванической развязки и согласования, емкости *C*5–*C*6 – функцию фильтрации низкочастотных помех.

Рассматриваемый процесс не адаптирован под разработку высокочастотных устройств, поэтому в библиотеке отсутствуют параметризованные ячейки катушек индуктивности и элементы планарного тракта – ячейки примитивов микрополосковых линий, ВЧ GSG контактные площадки. Данные элементы выполнены в сторонней системе автоматизированного проектирования с использованием электромагнитных симуляций по методу конечных элементов [12]. Интегральные катушки индуктивности выполняют функции дегенерации шума, согласования и ВЧ-развязки по питанию. Для разработки микросхемы использованы индуктивности с номиналами 2,5 нГн (в двух модификациях: с малой шириной и большой шириной для обеспечения требований технологии по электромиграции); 3,1; 0,7; 0,65 нГн. Данные номинальные значения выбраны таким образом, чтобы геометрия ячеек соответствовала максимальным значениям добротности при наибольшем значении индуктивности, а также удовлетворяла правилам проектирования, в частности, по плотности металлов и легированных слоев на единицу площади пластины. Данные факторы также ограничивают достижение наивысших параметров усиления и минимизации коэффициента шума и косвенно обусловливают наличие третьего каскада усиления. Все это связанно с особенностями базового техноло-

гического процесса, параметрами транзисторов и отсутствием «толстых» слоев проводника, что сказывается на добротности резонансных структур и является ограничивающим фактором для применения катушек с большими номиналами индуктивности. «Толстые» слои металлов при разработке катушек индуктивности не входят в состав библиотеки элементов и требуют отдельной разработки. Поэтому возникают сложности, связанные с емкостью подложки, эффектом скин-слоя и др.

Линейные параметры матриц рассеяния приведены на рис. 5. Усиление сигнала в рабочем диапазоне n7 составляет более 25 дБ при обратной изоляции (*S*12), превышающей уровень 40 дБ. Коэффициенты отражения по входу *S*11 и выходу *S*22 достигают 33 дБ, превышают значения 20 дБ на протяжении рабочего диапазона и охватывают большую часть частот 5G. Коэффициент шума составляет 1,7 дБ в диапазоне n7 и не превышает 2,5 дБ на протяжении полосы частот от 1,4 до 3,9 ГГц. Полученные значения являются следствием малой добротности резонансных структур, что следует из конструктивной особенности технологического процесса.

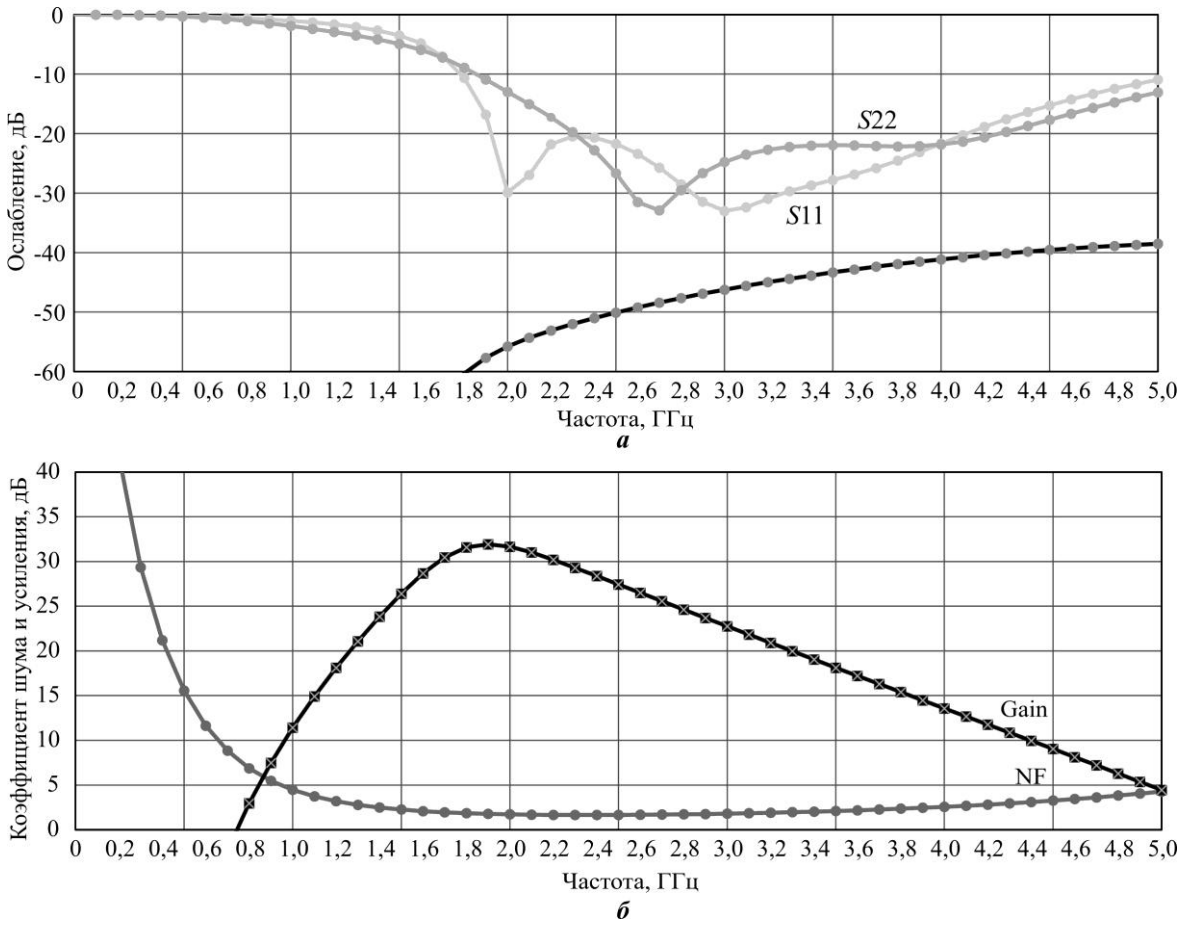


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика (*а*) и коэффициент шума (*б*) матриц рассеяния
Fig. 5. Frequency response (*a*) and noise figure graph (*b*) of the scattering matrix

Работа подстройки смещения входного каскада в диапазоне ±0,1 В от номинального питания затвора продемонстрирована на рис. 6. За счет изменения напряжения можно добиться приращения согласования входных цепей до 28 дБ дополнительного коэффициента отражения *S*11 в узкой полосе частот. Это повлияет на коэффициент шума, который будет изменяться в диапазоне 1,62–1,81 дБ.

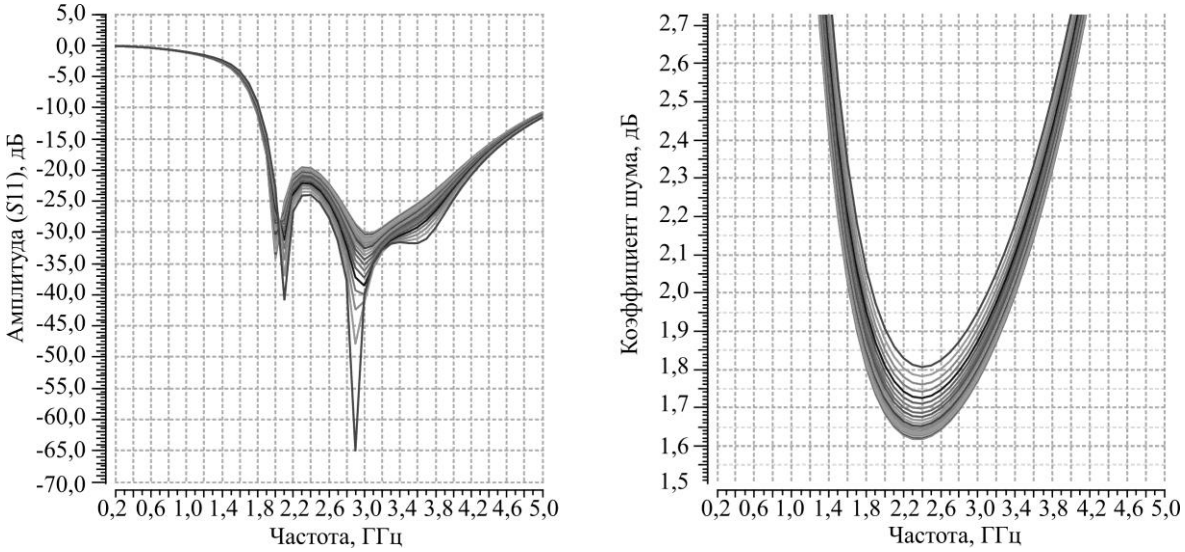


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика в зависимости от питания затвора входного каскада МШУ: *а* – для коэффициента отражения по входу (*S*11); *б* – для коэффициента шума
Fig. 6. Frequency response depending on the LNA input stage gate power supply: *a* – for the input reflection coefficient (*S*11); *b* – for the noise coefficient

Рабочая точка первого каскада выбрана для работы усилителя в максимально линейной области при невысоком потреблении с минимальным потреблением. Кроме того, каждый из каскадов усиления оптимизирован под безусловно стабильный режим работы. Следовательно, коэффициент стабильности $K>>1$, что потенциально исключает возможность генерации побочных гармонических составляющих (рис. 7).

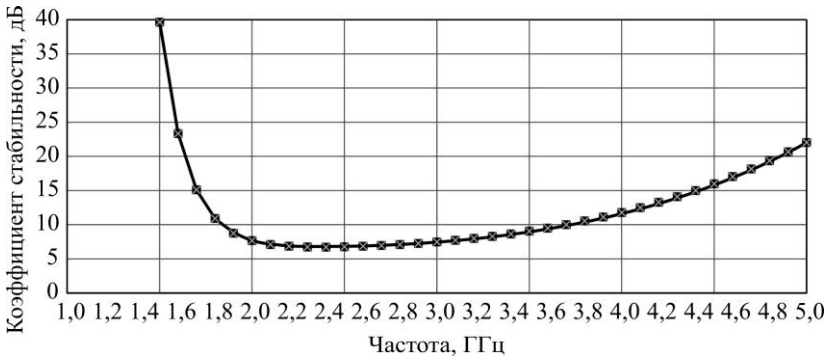


Рис. 7. Зависимость коэффициента стабильности МШУ от частоты
Fig. 7. Dependence of the LNA stability factor from the frequency

Нелинейные параметры МШУ, полученные в ходе компьютерных симуляций, представлены в виде зависимостей входной / выходной мощности на рис. 8. Уровень 1дБ компрессии (P1dB = 6,69 дБм), характеризующий границу линейной области, достигается при входном значении мощности –19 дБ. Таким образом, коэффициент усиления по мощности составляет примерно 27 дБ в точке 1дБ компрессии. Входной уровень интермодуляционных искажений второго порядка относительно гармоники 5,4 ГГц (IP2) равен 13,91 дБм, при выходном уровне (OIP2) составляет ≈ 39,0 дБм. Входной уровень интермодуляционных искажений третьего порядка относительно гармоники 8,1 ГГц (IP3) равен 1,03 дБм, при выходном уровне (OIP3) составляет ≈ 27,63 дБм.

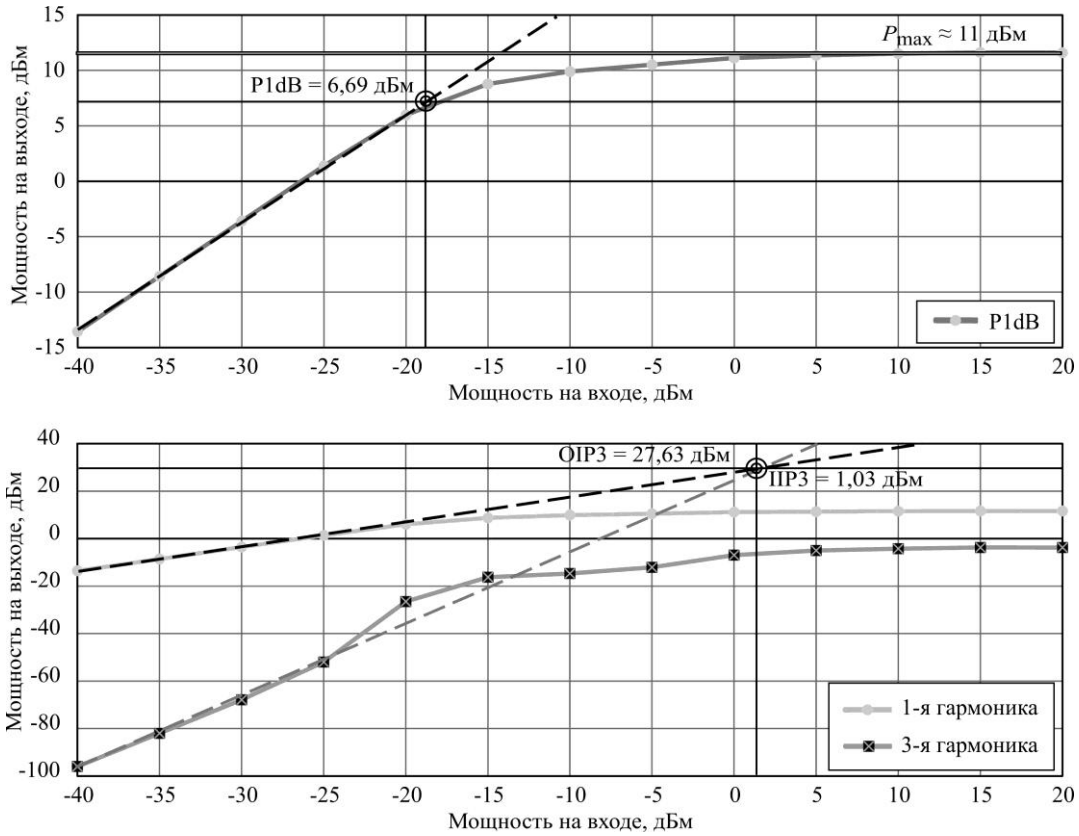


Рис. 8. Нелинейные параметры микросхемы МШУ
Fig. 8. Nonlinear LNA parameters

Топология МШУ представлена на рис. 9 (габариты кристалла 1,19×1,43 мм). Топология микросхемы выполнена с учетом всех требований выбранной технологии, включая требования к надежности, обусловливающие особенности конструкции планарных элементов. Схема имеет G-S-G входы-выходы для измерений с помощью СВЧ-зондов на пластине или для монтажа в корпус для дальнейших исследований с использованием современных измерительных комплексов.

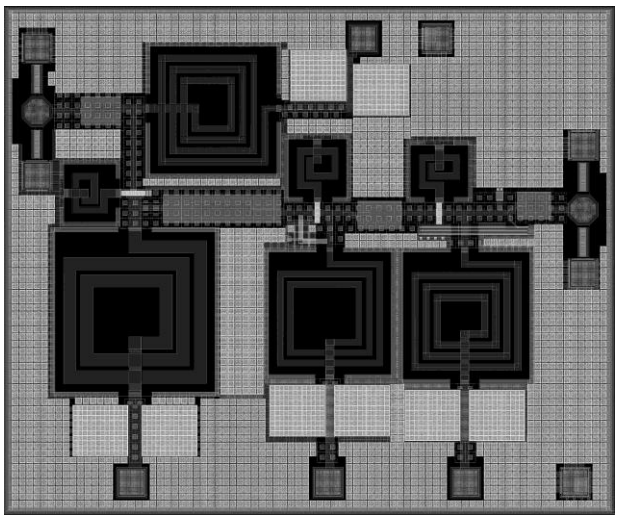


Рис. 9. Топология микросхемы малошумящего усилителя
Fig. 9. LNA IC topology

Заключение. Согласно сформулированным на основе расчетных данных и параметров, приведенных в стандарте, первичным требованиям к МШУ приемного тракта приемо-передающего устройства абонентского терминала разработана трехкаскадная микросхема усилителя класса А. Данная микросхема оптимизирована для работы с частотным диапазоном n7. Усилитель характеризуется высоким уровнем усиления внутри данного поддиапазона, составляющим +25 дБ, при уровне вносимого шума 1,7 дБ, коэффициенты отражения по входам и выходам устройства превышают 25 дБ. Высокая линейность устройства подтверждается компрессией, равной 6,7 дБм, при уровнях OIP3 = 27,6 дБм и IIP3 = 1,03 дБм. Усилитель выполнен на основе цифровой библиотеки КМОП-процесса с проектной нормой 180 нм, что демонстрирует возможность построения МШУ S-диапазонов на основе библиотеки HCMOS8D.

В рамках рассмотренного технологического процесса существует возможность построения приемо-передающей NB-IoT-системы на кристалле для работы в LTE-диапазонах.

Литература

1. ***Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В.*** Общая теория технологии и микроэлектроника. Ч. 1: Уровни описания технологии // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2017. № 1 (165). С. 51–69.

2. ***Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T.*** The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework // Computers in Industry. 2018. Vol. 101. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015

3. ***Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Мытник К. Я.*** Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 328–329. https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.328.329

4. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (release 16): 3GPP TR 38.901 // 3rd Generation Partnership Project Portal [Электронный ресурс]. URL: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173 (дата обращения: 09.09.2022).

5. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (release 17): 3GPP TS 38.104 // 3rd Generation Partnership Project Portal [Электронный ресурс]. URL: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3202 (дата обращения: 09.09.2022).

6. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (release 17): 3GPP TS 36.104 // 3rd Generation Partnership Project Portal [Электронный ресурс]. URL: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2412 (дата обращения: 09.09.2022).

7. Об использовании полос радиочастот радиоэлектронными средствами стандарта LTE и последующих его модификаций в режиме NB-IoT: решение ГКРЧ от 28 декабря 2017 г. № 17-44-06 // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: https://digital.gov.ru/uploaded/files/protokol-17-44.pdf (дата обращения: 09.09.2022).

8. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception. Part 1: Conformance testing (release 17): 3GPP TS 36.521-1 // 3rd Generation Partnership Project Portal [Электронный ресурс]. URL: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2469 (дата обращения: 09.09.2022).

9. Аспекты проектирования приемопередающего устройства «Интернета вещей» / ***В. Ю. Михайлов, Е. Ю. Котляров, И. А. Зубов и др.*** // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2020. № 4 (180). С. 43–57.

10. ***Красников Г. Я.*** Физико-технологические принципы и методы обеспечения качества КМОП БИС массового производства: дис. … д-ра техн. наук. М., 1996. 273 с.

11. ***Валеев А. С., Красников Г. Я.*** Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 3. С. 180–201. https://doi.org/10.7868/S0544126915030084

12. CMOS inductor design features for LTE devices / ***E. Yu. Kotlyarov, V. Yu. Mikhailov, I. A. Zubov et al.*** // Computing, Telecommunications and Control. 2021. Vol. 14. No 1. P. 22–32. https://doi.org/10.18721/JCSTCS.14102

Статья поступила в редакцию 29.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 20.07.2022 г.; принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Котляров Евгений Юрьевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ведущий инженер-конструктор отдела разработки интегральных схем АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр.1), ekotlyarov@niime.ru

Путря Михаил Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mishapmg@gmail.com

Михайлов Виктор Юрьевич – инженер-конструктор отдела разработки интегральных схем АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр.1), vmikhaylov@niime.ru

Зубов Игорь Александрович – начальник лаборатории отдела разработки интегральных схем АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр.1), izubov@niime.ru

Васильев Евгений Сергеевич – заместитель начальника отдела разработки интегральных схем АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр.1), evasilev@niime.ru

References

1. Krasnikov G. Ya., Gornev E. S., Matushkin I. V. General theory of technology and microelectronics. Part 1. Levels of technology. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3: Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics,* 2017, no. 1 (165), pp. 51–69. (In Russian).

2. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry,* 2018, vol. 101, pp. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015

3. Nuykin A. V., Kravtsov A. S., Mytnik K. Ya. Developing ultra-low power universal protected software and hardware platform for IoT devices. *Nanoindustriya = Nanoindustry,* 2019, no. S (89), pp. 328–329. (In Russian). https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.328.329

4. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16): 3GPP TR 38.901. *3rd Generation Partnership Project Portal.* Available at: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173 (accessed: 09.09.2022).

5. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (release 17): 3GPP TS 38.104. *3rd Generation Partnership Project Portal.* Available at: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3202 (accessed: 09.09.2022).

6. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (release 17): 3GPP TS 36.104. *3rd Generation Partnership Project Portal.* Available at: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2412 (accessed: 09.09.2022).

7. On the use of radio-frequency bands by LTE radioelectronic equipment and its further modifications in NB-IoT mode: decision of the State Committee of Radio Frequencies of December 28, 2017, No. 17-44-06. *Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation.* (In Russian). Available at: https://digital.gov.ru/uploaded/files/protokol-17-44.pdf (accessed: 09.09.2022).

8. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception. Part 1: Conformance testing (release 17): 3GPP TS 36.521-1. *3rd Generation Partnership Project Portal.* Available at: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2469 (accessed: 09.09.2022).

9. Mikhailov V. Yu., Kotlyarov E. Yu., Zubov I. A., Nuykin A. V, Kravtsov A. S. Aspects of the transceiver device design for ”Internet of Things”. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3: Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics,* 2020, no. 4 (180), pp. 43–57. (In Russian).

10. Krasnikov G. Ya. *Physical and technological principles and methods for quality assurance of mass production CMOS LSI,* diss. for the Dr. Sci. (Eng.). Moscow, 1996. 273 p. (In Russian).

11. Valeev A. S., Krasnikov G. Y. Manufacturing technology of intra- and interchip interconnects for modern ULSIs: Review and concepts of development. *Russ. Microelectron.,* 2015, vol. 44, iss. 3, pp. 154–172. https://doi.org/10.1134/S1063739715030087

12. Kotlyarov E. Yu., Mikhailov V. Yu., Zubov I. A., Nuykin A. V., Iljin A. F., Putrya M. G. CMOS inductor design features for LTE devices. *Computing, Telecommunications and Control,* 2021, vol. 14, no. 1, pp. 22–32. https://doi.org/10.18721/JCSTCS.14102

The article was submitted 29.04.2022; approved after reviewing 20.07.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Evgeny Yu. Kotlyarov – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Leading Design Engineer of the Integrated Circuit Development Department, “Research Institute of Molecular Electronics” JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Academician Valiev st., 6, bld. 1), ekotlyarov@niime.ru

Mikhail G. Putrya – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), mishapmg@gmail.com

Victor Yu. Mikhailov – Design Engineer of the Integrated Circuit Development Department, “Research Institute of Molecular Electronics” JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Academician Valiev st., 6, bld. 1), vmikhaylov@niime.ru

Igor A. Zubov – Head of the Laboratory of the Integrated Circuit Development Department, “Research Institute of Molecular Electronics” JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Academician Valiev st., 6, bld. 1), izubov@niime.ru

Evgeny S. Vasilyev – Deputy Head of the Integrated Circuit Development Department, “Research Institute of Molecular Electronics” JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Academician Valiev st., 6, bld. 1), evasilev@niime.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 – 2021 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

Научная статья
УДК 621.375.026
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-753-762

Достижение стабильной выходной мощности и эффективности усилителя мощности класса Е при изменении собственной индуктивности частотного фильтра и сопротивления нагрузки

К. О. Гуров, Э. А. Миндубаев, А. А. Данилов

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

constantinegurov@yandex.ru

Аннотация. Высокая эффективность усилителей мощности (УМ) класса Е позволяет использовать их в портативных устройствах, так как при больших уровнях выходной мощности можно достичь более длительного срока службы химического элемента питания. Существенная проблема усилителя мощности класса Е – изменение выходной мощности вследствие отклонения достигнутого режима работы даже при небольших изменениях номиналов собственной индуктивности частотного фильтра и сопротивления нагрузки. В работе предложен вариант решения данной проблемы с помощью динамического изменения емкостей конденсаторов в нагрузочной цепи УМ класса Е, которые зависят от номиналов собственной индуктивности частотного фильтра и сопротивления нагрузки. Исследована возможность достижения номинального и двух типов субноминальных режимов работы УМ класса Е при динамическом изменении емкостей конденсаторов в нагрузочной цепи в диапазоне номиналов частотного фильтра и сопротивления нагрузки. Обнаружено, что существуют такие номиналы емкостей конденсаторов, с помощью которых всегда можно достичь номинального или субноминальных режимов работы при любых значениях остальных компонентов схемы. При этом изменение номиналов частотного фильтра и сопротивления нагрузки с последующим достижением режима работы позволяет стабилизировать требуемую выходную мощность в УМ класса Е. Предложенная схема УМ класса Е стабилизирует выходную мощность (0,65 Вт) с эффективностью не менее 85 % при изменяемых сопротивлении нагрузки от 5 до 30 Ом и собственной индуктивности частотного фильтра от 5 до 15 мкГн.

Ключевые слова: усилитель мощности класса Е, режим работы усилителя мощности, стабильная выходная мощность

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-03-2020-216).

Для цитирования: Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Достижение стабильной выходной мощности и эффективности усилителя мощности класса Е при изменении собственной индуктивности частотного фильтра и сопротивления нагрузки // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 753–762. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-753-762

© К. О. Гуров, Э. А. Миндубаев, А. А. Данилов, 2022

Original article

Achieving stable output power and efficiency of a class E power amplifier while changing the self-inductance of the frequency filter and the load resistance

K. O. Gurov, E. A. Mindubaev, A. A. Danilov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

constantinegurov@yandex.ru

Abstract. High efficiency of the class E power amplifiers (PA) allows their use in portable devices because at high level of output power the chemical cells can reach longer lifetime. A significant problem of class E PA is the change in output power due to the deviation of the achieved operating mode even with small changes in the values of the self-inductance of the frequency filter and the load resistance. In this work, a solution to this problem is proposed by dynamically changing the capacitor capacitances in the load circuit of class E PA, which depend on the values of the self-inductance of the frequency filter and the load resistance. The possibility of achieving nominal and two types of subnominal operation modes of class E PA has been studied by dynamically changing the capacitor capacitances in the load circuit of class E PA in the values range of the frequency filter and the load resistance. It was found that there are such values of capacitor capacitances, with the help of which it is always possible to achieve nominal or subnominal operating modes for any values of the remaining components of the circuit. At the same time, changing the values of the frequency filter and the load resistance with the subsequent achievement of the operating mode makes it possible to stabilize the required output power in the class E PA. The proposed class E PA scheme allows the output power stabilization at 0.65 W with an efficiency of at least 85 % with a variable load resistance from 5 to 30 Ohm and a self-inductance of the frequency filter from 5 to 15 μH.

Keywords: class E power amplifier, power amplifier operating mode, stable output power

Funding: the work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-03-2020-216).

For citation: Gurov K. O., Mindubaev E. A., Danilov A. A. Achieving stable output power and efficiency of a class E power amplifier while changing the self-inductance of the frequency filter and the load resistance. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 753–762. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-753-762

Введение. Управление уровнем выходной мощности и достижение его стабильности при изменении параметров схемы – важная задача электронной техники. Решить ее возможно с помощью различных классов усилителей мощности (УМ) [1, 2], например УМ класса Е, получившего широкое распространение в технике [3–7] благодаря высокой эффективности, которая в идеальном случае может достигать 100 % [8]. Базовая электрическая схема УМ класса Е с нагрузкой R_{load} и частотным фильтром L_{series} (рис. 1)

нередко применяется в реальных устройствах ввиду простой конструкции и отсутствия необходимости в дополнительных реактивных компонентах, что позволяет минимизировать размеры электрической схемы [5, 6]. Теоретически высокая эффективность УМ класса Е дает возможность использовать его в портативных устройствах, так как при высоких уровнях выходной мощности можно достичь более длительного срока службы химического элемента питания [9, 10].

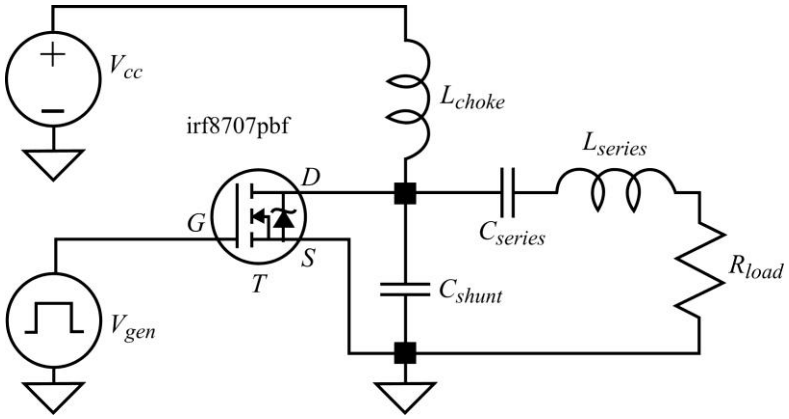


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема УМ класса Е (V_{cc} – напряжение источника питания; V_{gen} – генератор сигналов; L_{choke} – собственная индуктивность дросселя; L_{series} – частотный фильтр; C_{series}, C_{shunt} – последовательный и параллельный конденсаторы; R_{load} – нагрузка)

Fig. 1. Schematic circuit diagram of a class E power amplifier (V_{cc} – power supply voltage; V_{gen} – signal generator; L_{choke} – choke inductance; L_{series} – frequency filter; C_{series}, C_{shunt} – series and shunt capacitors; R_{load} – load)

Высокая эффективность УМ класса Е может быть получена при достижении режимов работы в усилителе, что позволит снизить рассеиваемую мощность P_{loss} в транзисторе T [8, 11]. Это, в свою очередь, уменьшит вероятность отказа T. Однако базовая электрическая схема УМ класса Е имеет тенденцию существенно отклоняться от достигнутого режима работы при небольших изменениях R_{load} и L_{series} [12]. Следовательно, возникает необходимость разработки УМ класса Е, обеспечивающего работу со стабильными выходными характеристиками в определенном диапазоне значений R_{load} и L_{series}.

Цель настоящей работы – исследование достижения различных режимов работы УМ класса Е при изменении номиналов компонентов L_{series} и R_{load} и разработка схемы УМ класса Е со стабильной выходной мощностью при изменении R_{load} и L_{series}.

Режимы работы усилителя мощности класса Е. Выделяют два режима работы УМ класса Е – номинальный и субноминальный [13]. УМ класса Е, работающий в номинальном режиме, одновременно удовлетворяет условию переключения при нулевом напряжении (ZVS), а также при нулевой первой производной напряжения (ZVDS) [14]. Для каждого УМ класса Е с фиксированными входными параметрами существует только один набор значений компонентов, при котором УМ класса Е работает в номинальном режиме. В таком случае амплитуда напряжения на частотном фильтре L_{series} постоянна и пропорциональна напряжению источника питания [15]. При работе УМ класса Е в субноминальном режиме выполняется только условие ZVS [16]. Сдвиг фаз φ между управляющим сигналом на затворе, определяющим частоту переключения T, и выходным током через R_{load} позволяет различать субноминальные режимы работы: $\varphi > \varphi_{nominal}$ и $\varphi < \varphi_{nominal}$, где $\varphi = 147{,}5°$ – номинальный режим работы $\varphi_{nominal}$ [8, 11, 17]. В свою очередь, изменение номиналов конденсаторов C_{shunt} и C_{series} дает возможность достичь

номинального или субноминальных режимов работы. Визуально определить их достижение помогают осциллограммы напряжения сток-исток $U_{СИ}$ и тока стока I_C в транзисторе T [11, 18]. При этом изменение режима работы УМ класса Е влияет на значение выходной мощности $P_{R_{load}}$ и эффективности η. Таким образом, изменяя режим работы УМ класса Е с помощью динамического изменения емкостей C_{shunt} и C_{series}, можно достичь и стабилизировать требуемую $P_{R_{load}}$.

Моделирование. С использованием программы для моделирования LTSpice и аналитических выражений для определения номиналов C_{series} и C_{shunt} [9, 16–18] исследованы схемы со следующими электрическими параметрами: напряжение источника питания $V_{cc} = 7$ В; напряжение генератора $V_{gen} = 5$ В с частотой прямоугольного сигнала 1 МГц; собственная индуктивность дросселя $L_{choke} = 1000$ мкГн; L_{series} в диапазоне 5–15 мкГн; R_{load} в диапазоне 5–30 Ом. Получены осциллограммы $U_{СИ}$ и I_C для визуального определения достижения диапазона режимов работы (рис. 2, *а*). На рис. 2, *б* показан пример достижения номинального режима работы УМ класса Е.

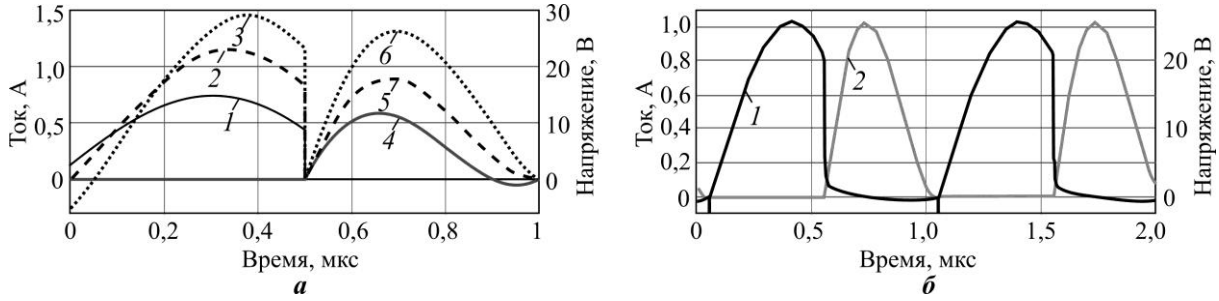


Рис. 2. Осциллограммы: *а* – тока стока I_C (кривые *1–3*) и напряжения сток-исток $U_{СИ}$ (кривые *4–6*) в транзисторе T на основе данных аналитических выражений для определения номиналов C_{shunt} и C_{series}; субноминальный режим работы $\varphi > \varphi_{nominal}$ (кривые *1*, *4*), номинальный $\varphi = \varphi_{nominal}$ (кривые *2*, *5*), субноминальный $\varphi < \varphi_{nominal}$ (кривые *3*, *6*); *б* – тока стока I_C (кривая *1*) и напряжения сток-исток $U_{СИ}$ (кривая *2*) на основе данных моделирования в LTSpice при номинальном режиме работы УМ класса Е при $L_{series} = 10$ мкГн, $R_{load} = 10$ Ом

Fig. 2. Oscillograms: *a* – drain current I_D (curves *1–3*) and drain-to-source voltage U_{DS} (curves *4–6*) in transistor T based on data from analytical expressions for determining the values of C_{shunt} and C_{series}; subnominal operation mode $\varphi > \varphi_{nominal}$ (curves *1*, *4*), nominal $\varphi = \varphi_{nominal}$ (curves *2*, *5*), subnominal $\varphi < \varphi_{nominal}$ (curves *3*, *6*); *b* – drain current I_D (curve *1*) and drain-to-source voltage U_{DS} (curve *2*) based on data from the simulation in LTSpice at the nominal operating mode of class E power amplifier at $L_{series} = 10$ μH, $R_{load} = 10$ Ohm

Построены зависимости номиналов C_{shunt} от C_{series} (характеристические кривые) и рассчитаны значения $P_{R_{load}}$, η и P_{loss} для режимов работы УМ класса Е при изменении L_{series} от 5 до 15 мкГн (табл. 1 и рис. 3, *а*) и R_{load} от 5 до 30 Ом (табл. 2 и рис. 3, *б*). Установлено, что при увеличении индуктивности L_{series} в 3 раза область номинального режима работы значительно снижается относительно номинала C_{series} (изменение более чем в 5 раз) и снижается незначительно относительно номинала C_{shunt} (изменение менее чем в 1,1 раза). Кривые $C_{shunt} - C_{series}$ при изменении φ имеют сложный характер. Например, диапазоны субноминального режима работы при $\varphi > \varphi_{nominal}$ представлены прямыми линиями на рис. 3. Такая линия является прямой до $R_{load} = 15$ Ом (см. рис. 3, *б*), но при дальнейшем увеличении R_{load} линия скругляется в большую сторону и «поднимает» область точки номинального режима работы. Такой же эффект можно наблюдать при изменении L_{series}: для значений L_{series} более 10 мкГн субноминальный режим работы при $\varphi > \varphi_{nominal}$ представлен прямой линией, однако при L_{series} менее 10 мкГн линия скругляется (рис. 3, *а*).

Таблица 1

Выходные характеристики УМ класса Е
при изменении собственной индуктивности L_{series}

Table 1

Output characteristics of power class E amplifier while changing the self-inductance of the frequency filter L_{series} (in all cases, class E power amplifier operates in nominal mode)

L_{series}, мкГн	C_{shunt}, нФ	C_{series}, нФ	$P_{R_{load}}$, Вт	η, %	P_{loss}, мВт
5	3,07	10,56	1,48	84,9	30,3
8	3,01	4,67	1,45	85,4	30,7
10	2,97	3,36	1,48	85,1	30,6
12	2,94	2,65	1,47	85,1	30,7
15	2,91	2,01	1,47	85,1	30,8

Примечание. Во всех случаях УМ класса Е работает в номинальном режиме.

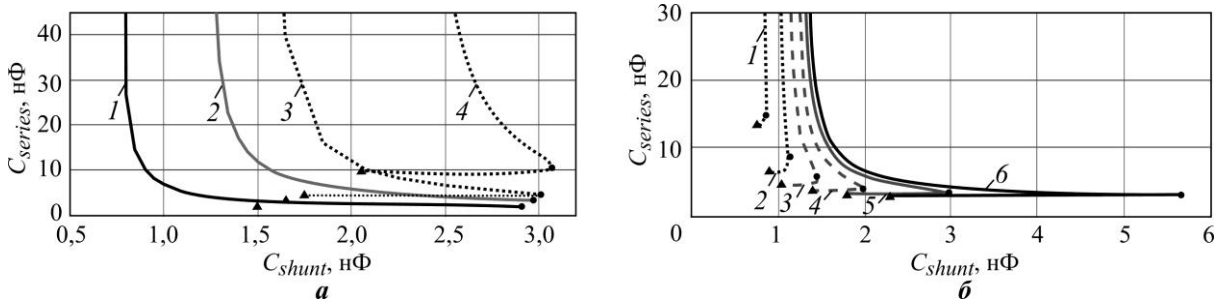


Рис. 3. Характеристические кривые, представленные диапазонами областей режимов работы УМ класса Е: *а* – при изменении собственной индуктивности L_{series} = 15; 10; 8; 5 мкГн (кривые *1–4* соответственно); *б* – при изменении сопротивления R_{load} = 30; 25; 20; 15; 10; 5 Ом (кривые *1–6* соответственно) (▲ – граничное значение кривой при $\varphi > \varphi_{nominal}$; • – номинальный режим работы)

Fig. 3. Characteristic curves, represented by ranges of operating modes of class E power amplifier: *a* – when changing its own inductance L_{series} = 15; 10; 8; 5 μH (curves *1– 4*): *b* – with a change in resistance R_{load} = 30; 25; 20; 15; 10; 5 Ohm (curves *1– 6*) (▲ – the boundary value of the curve at $\varphi > \varphi_{nominal}$; • – nominal operating mode)

Таблица 2

Выходные характеристики УМ класса Е
при изменении сопротивления нагрузки R_{load}

Table 2

Output characteristics of class E power amplifier while changing the load resistance R_{load} (in all cases, class E power amplifier operates in nominal mode)

R_{load}, Ом	C_{shunt}, нФ	C_{series}, нФ	$P_{R_{load}}$, Вт	η, %	P_{loss}, мВт
30	0,85	12,20	0,68	96,9	28,4
20	1,51	5,19	0,90	96,5	28,5
15	2,07	3,97	1,26	96,4	29,1
10	3,17	3,32	1,83	96,1	31,4
5	6,34	2,84	3,75	95,2	40,5
4	7,91	2,78	4,34	94,9	47,2
3	10,50	2,70	5,96	94,3	60,0
2	15,55	2,63	8,91	93,1	99,7
1	29,99	2,57	14,75	86,1	259,5

Примечание. Во всех случаях УМ класса Е работает в номинальном режиме.

Верхние части кривых (см. рис. 3) – субноминальный режим работы при $\varphi < \varphi_{nominal}$ и они приближены по форме к экспоненциальным до $R_{load} = 15$ Ом или до $L_{series} = 10$ мкГн. При дальнейшем увеличении R_{load} или уменьшении L_{series} характеристическая кривая выпрямляется. Так, кривая субноминального режима работы при $\varphi < \varphi_{nominal}$ представляет собой вертикальную прямую линию при $R_{load} = 30$ Ом (см. рис. 3, *б*) или при $L_{series} = 1$ мкГн (см. рис. 3, *а*). Пересечение кривых субноминальных режимов работы $\varphi > \varphi_{nominal}$ и $\varphi < \varphi_{nominal}$ образует область номинального режима работы (см. рис. 3). В свою очередь, все точки номинального режима работы образуют линию экспоненциальной формы при изменении R_{load} или L_{series}. Точки номинального режима работы являются не точными значениями с координатами номиналов C_{series} и C_{shunt}, а небольшими областями вокруг данной точки. Такой эффект возникает из-за того, что отклонение 1–5 % от номиналов емкостей C_{series} и C_{shunt} при номинальном режиме работы не приводит к видимому изменению осциллограмм $U_{СИ}$ и $I_{С}$, а также значений $P_{R_{load}}$ и η.

Влияние R_{load} и L_{series} на выходную мощность и эффективность. Зависимости $P_{R_{load}}$ и η можно построить от отдельного номинала конденсатора, например C_{shunt}, поскольку каждая точка на характеристической кривой $C_{shunt} – C_{series}$ имеет отдельное значение для $P_{R_{load}}$ и η. При увеличении L_{series} от 8 до 12 мкГн $P_{R_{load}}$ для номинального режима работы незначительно изменяется в диапазоне 1,433–1,474 Вт (рис. 4, *а*), а эффективность сохраняется на уровне 85 % (рис. 5, *а*). Можно провести множество прямых горизонтальных линий, которые пересекают кривые зависимости $P_{R_{load}}$ от C_{shunt} (см. рис. 4, *а*), со стабильным значением $P_{R_{load}}$. Например, можно достичь стабильного значения $P_{R_{load}} = 0{,}65$ Вт (пунктирная прямая на рис. 4, *а*). Таким образом, при отклонении номинала L_{series} можно фиксировать значения $P_{R_{load}}$ на требуемом уровне, изменяя режим работы УМ класса Е при динамическом изменении емкостей конденсаторов C_{series} и C_{shunt}.

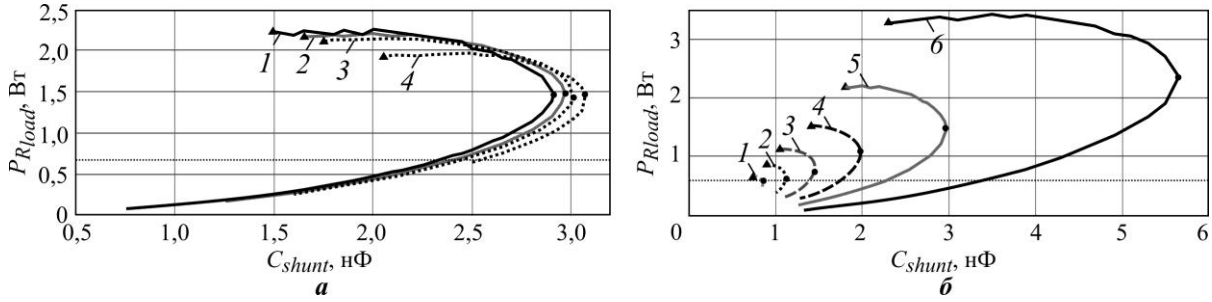


Рис. 4. Области режимов работы УМ класса Е на зависимостях $P_{R_{load}}$ от C_{shunt}: *а* – при изменении $L_{series} = 15$; 10; 8; 5 мкГн (кривые *1–4* соответственно); *б* – при изменении $R_{load} = 30$; 25; 20; 15; 10; 5 Ом (кривые *1–6* соответственно) (▲ – граничное значение кривой при $\varphi > \varphi_{nominal}$; • – номинальный режим работы)

Fig. 4. Areas of operating modes of class E power amplifier on dependencies $P_{R_{load}}$ versus C_{shunt}: *a* – while changing $L_{series} = 15$; 10; 8; 5 μH (curves *1–4*); *b* – while changing $R_{load} = 30$; 25; 20; 15; 10; 5 Ohm (curves *1–6*) (▲ – the boundary value of the curve at $\varphi > \varphi_{nominal}$; • – nominal operating mode)

Получены зависимости $P_{R_{load}}$ от C_{shunt} (рис. 4, *б*) и η от C_{shunt} (рис. 5, *б*) для номинального и субноминальных режимов работы УМ класса Е при изменении R_{load}. Установлено, что диапазон возможных значений $P_{R_{load}}$ и η увеличивается с уменьшением R_{load}. При этом значения $P_{R_{load}}$ и η имеют обратную зависимость. Например, для

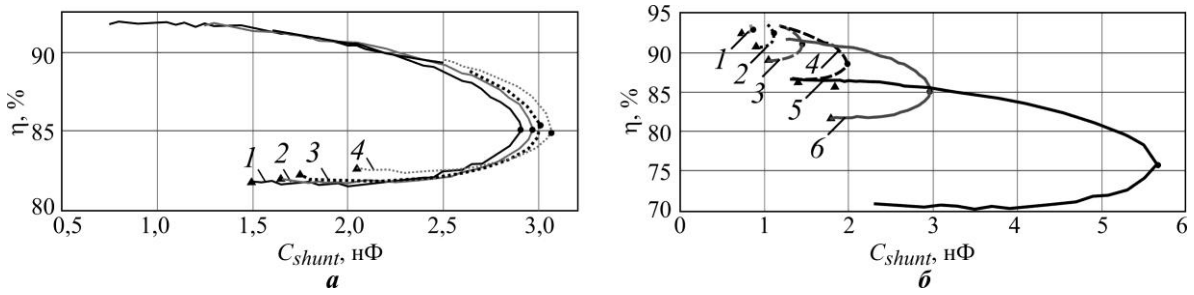


Рис. 5. Области режимов работы УМ класса Е на зависимостях η от C_{shunt}: *а* – при изменении L_{series} = 15; 10; 8; 5 мкГн (кривые *1–4* соответственно); *б* – при изменении R_{load} = 30; 25; 20; 15; 10; 5 Ом (кривые *1– 6* соответственно) (▲ – граничное значение кривой при φ > $\varphi_{nominal}$; • – номинальный режим работы)

Fig. 5. Areas of operating modes of class E PA on dependencies η versus C_{shunt} : *a* – while changing L_{series} = 15; 10; 8; 5 μH (curves *1–4*); *b* – while changing R_{load} = 30; 25; 20; 15; 10; 5 Ohm (curves *1–6*) (▲ – the boundary value of the curve at φ > $\varphi_{nominal}$; • – nominal operating mode)

R_{load} = 10 Ом диапазон возможного значения $P_{R_{load}}$ составляет 0,17–2,10 Вт для достигнутого режима работы, диапазон возможного значения η составляет 82–92 % при изменении номиналов C_{series} и C_{shunt}. В этом случае условие ZVS будет выполняться для каждой точки характеристической кривой $C_{shunt} – C_{series}$. Как и в случае изменения L_{series}, можно провести множество прямых горизонтальных линий, которые пересекают кривые зависимости $P_{R_{load}}$ от C_{shunt} (см. рис. 4, *б*), со стабильным значением $P_{R_{load}}$. Например, можно достичь стабильной выходной мощности $P_{R_{load}}$ = 0,65 Вт (пунктирная прямая на рис. 4, *б*). Таким образом, при отклонении номинала R_{load} можно фиксировать значения $P_{R_{load}}$ на требуемом уровне, изменяя режим работы УМ класса Е при динамическом изменении емкостей конденсаторов C_{series} и C_{shunt}.

Заключение. В ходе проведенного моделирования УМ класса Е обнаружена и описана зависимость номиналов C_{shunt} от C_{series} (характеристические кривые) для множества точек режимов работы при пошаговом изменении номинала одного из конденсаторов C_{series} или C_{shunt} и настройке другого для достижения переключения при нулевом напряжении. Исследование влияния собственной индуктивности частотного фильтра L_{series} на достижение режимов работы УМ класса Е показало, что при увеличении индуктивности L_{series} характеристическая кривая $C_{shunt} – C_{series}$ существенно снижается относительно номинала C_{series} и незначительно снижается относительно номинала C_{shunt}. Определено, что при изменении номинала L_{series} и номинала R_{load} можно получить стабильные значения выходных характеристик схемы ($P_{R_{load}}$ и η), динамически меняя режим работы УМ класса Е с помощью номиналов емкостей C_{series} и C_{shunt}. В свою очередь, для уменьшения диапазона изменения номиналов емкостей C_{series} и C_{shunt} можно увеличить номинал L_{series}. Предложенный пример схемы УМ класса Е стабилизирует выходную мощность (0,65 Вт) с эффективностью не менее 85 % при изменяемых сопротивлении нагрузки от 5 до 30 Ом и собственной индуктивности частотного фильтра от 5 до 15 мкГн.

Литература

1. ***Quezon P. T., Francis de Guzman M., Mendoza G. G.*** RF power amplifier efficiency improvement under antenna impedance variation using a tunable matching network // TENCON 2018 – 2018 IEEE Region 10 Conference. Jeju: IEEE, 2018. P. 0333–0337. https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650383

2. ***Min-Pyo L., Kim S., Hong S.-J., Kim D.-W.*** Compact 20-W GaN internally matched power amplifier for 2.5 GHz to 6 GHz jammer systems // Micromachines. 2020. Vol. 11. Iss. 4. Art. No. 375. https://doi.org/10.3390/mi11040375

3. ***Raja R., Theegala R., Venkataramani B.*** A class-E power amplifier with high efficiency and high power-gain for wireless sensor network // Microsyst. Technol. 2017. Vol. 23. Iss. 9. P. 4179–4193. https://doi.org/10.1007/s00542-016-3022-0

4. ***Zahid M. N., Jiang J., Lu H., Zhang H.*** A modified design of class-E power amplifier with balanced FETs and high output power for RFID applications // Proceedings of Engineering and Technology Innovation. 2021. Vol. 19. P. 28–37. https://doi.org/10.46604/peti.2021.7442

5. ***Kilinc E. G., Dehollain C., Maloberti F.*** Remote powering and data communication for implanted biomedical systems. Cham: Springer, 2016. X, 146 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21179-4

6. Class E power amplifier design and optimization for the capacitive coupled wireless power transfer system in biomedical implants / ***R. Narayanamoorthi, J. A. Vimala, C. Bharatiraja et al.*** // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 9. Art. No. 1409. https://doi.org/10.3390/en10091409

7. A device for wireless powering of battery-free implants via inductive coupling / ***A. A. Danilov, E. A. Mindubaev, K. O. Gurov et al.*** // Biomed. Eng. 2020. Vol. 53. Iss. 5. P. 309–311. https://doi.org/10.1007/s10527-020-09932-2

8. ***Kubowicz R.*** Class-E power amplifier: MSc (El. and Comp. Eng.) diss. Toronto, 2000. 97 p.

9. Analysis and implementation of inverter wide-range soft switching in WPT system based on class E inverter / ***S. Zhang, J. Zhao, Y. Wu et al.*** // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 19. Art. No. 5187. https://doi.org/10.3390/en13195187

10. ***Surkov O. A., Danilov A. A., Mindubaev E. A.*** An algorithm for designing AC generators for inductive powering systems of batteryless implants // Biomed. Eng. 2019. Vol. 52. Iss. 5. P. 331–334. https://doi.org/10.1007/s10527-019-09841-z

11. ***Sokal N. O.*** Class-E RF power amplifiers // QEX. 2001. Vol. 204 (1). P. 9–20.

12. ***Ahmadi M. M., Salehi-Sirzar M.*** A self-tuned class-E power oscillator // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34. No. 5. P. 4434–4449. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2859387

13. ***Liu H., Shao Q., Fang X.*** Modeling and optimization of class-E amplifier at subnominal condition in a wireless power transfer system for biomedical implants // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. 2017. Vol. 11. No. 1. P. 35–43. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2016.2538320

14. ***Chen P., He S.*** Investigation of inverse class-E power amplifier at sub-nominal condition for any duty ratio // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2015. Vol. 62. No. 4. P. 1015–1024. https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2390557

15. ***Ahmadi M. M., Pezeshkpour S., Kabirkhoo Z.*** A high-efficiency ASK-modulated class-E power and data transmitter for medical implants // IEEE Transactions on Power Electronics. 2022. Vol. 37. No. 1. P. 1090–1101. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3092829

16. ***Hayati M., Lotfi A., Kazimierczuk M. K., Sekiya H.*** Modeling and analysis of class-E amplifier with a shunt inductor at sub-nominal operation for any duty ratio // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2014. Vol. 61. No. 4. P. 987–1000. https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2283692

17. ***Hayati M., Lotfi A., Kazimierczuk M. K., Sekiya H.*** Performance study of class-E power amplifier with a shunt inductor at subnominal condition // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. No. 8. P. 3834–3844. https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2227814

18. ***Gurov K. O., Mindubaev E. A., Danilov A. A.*** Increasing power performance for a class E amplifier based on analysis of the transistor drain current oscillogram // Russ. Electr. Engin. 2021. Vol. 92. Iss. 12. P. 761–766. https://doi.org/10.3103/S1068371221120087

Статья поступила в редакцию 08.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 24.08.2022 г.;
принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Гуров Константин Олегович – аспирант, инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), constantinegurov@yandex.ru

Миндубаев Эдуард Адипович – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), edmindubaev@gmail.com

Данилов Арсений Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории беспроводных биомедицинских интерфейсов Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), arseny.danilov@gmail.com

References

1. Quezon P. T., Francis de Guzman M., Mendoza G. G. RF power amplifier efficiency improvement under antenna impedance variation using a tunable matching network. *TENCON 2018 – 2018 IEEE Region 10 Conference.* Jeju, IEEE, 2018, pp. 0333–0337. https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650383

2. Min-Pyo L., Kim S., Hong S.-J., Kim D.-W. Compact 20-W GaN internally matched power amplifier for 2.5 GHz to 6 GHz jammer systems. *Micromachines,* 2020, vol. 11, iss. 4, art. no. 375. https://doi.org/10.3390/mi11040375

3. Raja R., Theegala R., Venkataramani B. A class-E power amplifier with high efficiency and high power-gain for wireless sensor network. *Microsyst. Technol.,* 2017, vol. 23, iss. 9, pp. 4179–4193. https://doi.org/10.1007/s00542-016-3022-0

4. Zahid M. N., Jiang J., Lu H., Zhang H. A modified design of class-E power amplifier with balanced FETs and high output power for RFID applications. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation,* 2021, vol. 19, pp. 28–37. https://doi.org/10.46604/peti.2021.7442

5. Kilinc E. G., Dehollain C., Maloberti F. *Remote powering and data communication for implanted biomedical systems.* Cham, Springer, 2016. x, 146 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21179-4

6. Narayanamoorthi R., Vimala J. A., Bharatiraja C., Chokkalingam B., Padmanaban S., Leonowicz Z. M. Class E power amplifier design and optimization for the capacitive coupled wireless power transfer system in biomedical implants. *Energies,* 2017, vol. 10, iss. 9, art. no. 1409. https://doi.org/10.3390/en10091409

7. Danilov A. A., Mindubaev E. A., Gurov K. O., Aubakirov R. R., Surkov O. A., Ryabchenko E. V., Selishchev S. V. A device for wireless powering of battery-free implants via inductive coupling. *Biomed. Eng.,* 2020, vol. 53, iss. 5, pp. 309–311. https://doi.org/10.1007/s10527-020-09932-2

8. Kubowicz R. *Class-E power amplifier.* MSc (El. and Comp. Eng.) diss. Toronto, 2000. 97 p.

9. Zhang S., Zhao J., Wu Y., Mao L., Xu J., Chen J. Analysis and implementation of inverter wide-range soft switching in WPT system based on class E inverter. *Energies,* 2020, vol. 13, iss. 19, art. no. 5187. https://doi.org/10.3390/en13195187

10. Surkov O. A., Danilov A. A., Mindubaev E. A. An algorithm for designing AC generators for inductive powering systems of batteryless implants. *Biomed. Eng.,* 2019, vol. 52, iss. 5, pp. 331–334. https://doi.org/10.1007/s10527-019-09841-z

11. Sokal N. O. Class-E RF power amplifiers. *QEX,* 2001, vol. 204 (1), pp. 9–20.

12. Ahmadi M. M., Salehi-Sirzar M. A self-tuned class-E power oscillator. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 2019, vol. 34, no. 5, pp. 4434–4449. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2859387

13. Liu H., Shao Q., Fang X. Modeling and optimization of class-E amplifier at subnominal condition in a wireless power transfer system for biomedical implants. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems,* 2017, vol. 11, no. 1, pp. 35–43. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2016.2538320

14. Chen P., He S. Investigation of inverse class-E power amplifier at sub-nominal condition for any duty ratio. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,* 2015, vol. 62, no. 4, pp. 1015–1024. https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2390557

15. Ahmadi M. M., Pezeshkpour S., Kabirkhoo Z. A high-efficiency ASK-modulated class-E power and data transmitter for medical implants. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 2022, vol. 37, no. 1, pp. 1090–1101. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3092829

16. Hayati M., Lotfi A., Kazimierczuk M. K., Sekiya H. Modeling and analysis of class-E amplifier with a shunt inductor at sub-nominal operation for any duty ratio. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,* 2014, vol. 61, no. 4, pp. 987–1000. https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2283692

17. Hayati M., Lotfi A., Kazimierczuk M. K., Sekiya H. Performance study of class-E power amplifier with a shunt inductor at subnominal condition. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 2013, vol. 28, no. 8, pp. 3834–3844. https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2227814

18. Gurov K. O., Mindubaev E. A., Danilov A. A. Increasing power performance for a class E amplifier based on analysis of the transistor drain current oscillogram. *Russ. Electr. Engin.,* 2021, vol. 92, iss. 12, pp. 761–766. https://doi.org/10.3103/S1068371221120087

The article was submitted 08.06.2022; approved after reviewing 24.08.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Konstantin O. Gurov – PhD student, Engineer of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), constantinegurov@yandex.ru

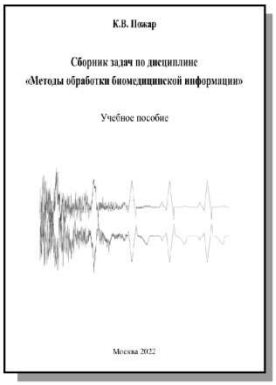
Eduard A. Mindubaev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Engineer of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), edmindubaev@gmail.com

Arseny A. Danilov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Head of the Research Laboratory of Wireless Biomedical Interfaces of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), arseny.danilov@gmail.com

Издательско-полиграфический комплекс
Национального исследовательского университета «МИЭТ»
информирует

Вышло в свет учебное пособие

Пожар К.В. Сборник задач по дисциплине «Методы обработки биомедицинской информации»: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2022. 112 с.: ил.



Настоящее учебное пособие содержит базовые теоретические сведения и примеры решения задач, связанных с преобразованием и математической обработкой непрерывных и дискретных сигналов. Рассматриваются задачи представления информации в частотной области, а также построения и анализа аналоговых и цифровых линейных фильтров.

Для студентов технических специальностей, относящихся к биомедицинской инженерии, приборостроению и сенсорике.

ISBN 978-5-7256-0987-5

Научная статья
УДК 621.3.049.771.14:004.032.26:004.588
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-763-773

Прогнозирование мощности утечки на основе машинного обучения на этапе планировки физического проектирования ИС

***В. А. Джанполадов*[1,2], *С. В. Гаврилов*[1,3]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*ЗАО «Синопсис Армения», г. Ереван, Армения*
[3]*Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия*

vakhtang.janpoladov@gmail.com

Аннотация. Процесс проектирования ИС включает в себя итерационные этапы оптимизации схем, а так как время выхода на рынок имеет решающее значение для отрасли, разработка эффективных методов оценки параметров ИС на ранних стадиях процесса проектирования – важная задача. В работе предложено использование алгоритмов машинного обучения для прогнозирования мощности утечки на этапе планировки физического проектирования для конкретной архитектуры. Эффективность предложенного метода продемонстрирована для блока, содержащего 64-разрядный арифметико-логический блок (ALU), связанный с регистрами общего назначения (GPRS). Данный блок разработан для 486 различных конфигураций и сценариев. В результате применения машинного обучения получен прогноз мощности утечки с разумной точностью для различных групп стандартных ячеек в блоках, предназначенных для различных сценариев. В предлагаемом методе не используются технологически зависимые данные, что делает его универсальным для любых технологических узлов, применяемых для проектирования различных блоков. Недостатком метода является необходимость прохождения полного потока проектирования для выбранной схемы с выбранным диапазоном параметров для сбора необходимых обучающих данных, что требует дополнительных ресурсов.

Ключевые слова: мощность утечки, СБИС, интегральные схемы, арифметико-логический блок, машинное обучение, регрессия, нейронные сети, прогнозирование

Для цитирования: Джанполадов В. А., Гаврилов С. В. Прогнозирование мощности утечки на основе машинного обучения на этапе планировки физического проектирования ИС // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 763–773. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-763-773

© В. А. Джанполадов, С. В. Гаврилов, 2022

Original article

A machine learning-based leakage power prediction at floorplan stage of IC physical design

***V. A. Janpoladov*[1,2], *S. V. Gavrilov*[1,3]**

[1]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[2]*"Synopsys Armenia" CJSC, Yerevan, Armenia*
[3]*Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

vakhtang.janpoladov@gmail.com

Abstract. The IC design process includes iterative stages for circuit optimization, and since time-to-market is critical for the industry, it is very important to develop effective methods to evaluate the parameters of the IC at the early stages of the design process. In this work, the use of machine learning algorithms to predict the leakage power at the floorplan stage of the physical design for a specific architecture is proposed. The effectiveness of the proposed method was demonstrated for a block containing a 64-bit Arithmetic Logic Unit (ALU) coupled with General-Purpose Registers (GPRs). This block has been designed for 486 different configurations and scenarios. As a result of the application of machine learning, a prediction of the leakage power with reasonable accuracy is obtained for various groups of standard cells in blocks designed for various scenarios. The proposed method uses no technology-dependent data and therefore is universal for any technological nodes used for designing different blocks. The disadvantage of the method is the need to go through the full design flow for the selected circuit with the selected range of parameters for collecting necessary training data, which requires additional resources.

Keywords: leakage power, VLSI, integrated circuits, arithmetic logic unit, machine learning, regression, neural networks, prediction

For citation: Janpoladov V. A., Gavrilov S. V. A machine learning-based leakage power prediction at floorplan stage of IC physical design. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 763–773. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2022-27-6-763-773

Введение. Энергопотребление является одним из наиболее важных параметров в устройствах, основанных на передовых технологических узлах, наряду с временными параметрами и занимаемой площадью. Мощность утечки также становится доминирующим фактором в современных ИС. Точный расчет мощности утечки требует значительных ресурсов и чрезмерного времени выполнения. Кроме того, анализ может быть выполнен только на поздней стадии процесса проектирования после физического проектирования и моделирования на уровне вентилей. Таким образом, оптимизация мощности утечки и других параметров может носить итеративный характер, что напрямую влияет на время выхода устройства на рынок для проектируемого чипа.

Физическое проектирование в маршруте проектирования ИС – сложный и трудоемкий процесс, который состоит из нескольких этапов, таких как планировка, размещение стандартных ячеек и макроблоков, синтез деревьев тактовых синхросигналов, трас-

сировка сигналов, оптимизация ряда физических параметров и верификация полученной топологии. Поэтому вопрос о том, как спрогнозировать различные характеристики чипа с приемлемой точностью на ранних этапах проектирования с учетом эффектов готовой топологии, актуален. Для такого рода сложных задач может быть применено машинное обучение. В настоящее время машинное обучение активно интегрируется во весь процесс проектирования ИС, особенно в физическое проектирование [1].

Существует большое разнообразие задач, эффективность которых может быть повышена с помощью интеграции машинного обучения в физическое проектирование. Например, прогнозирование результатов глобальной и детальной трассировки продемонстрировано в работе [2], прогнозирование временных параметров до трассировки представлено в [3], эффективность прогнозирования временных параметров на ранней стадии проектирования рассмотрена в [4]. В работе [5] показано высокоточное прогнозирование мощности утечки на уровне SPICE. В настоящей работе рассматривается использование алгоритмов машинного обучения для прогнозирования мощности утечки на этапе планировки физического проектирования с различными конфигурациями для разных сценариев. Анализ и оптимизация на этапе проектирования ИС сокращают итерации в случае конкретной архитектуры проектируемого устройства.

Создание набора данных и их предварительная обработка. Для машинного обучения моделей необходимо сначала подготовить набор данных, на основе которого будет реализовано обучение. Разработан модуль с использованием языка описания аппаратуры Verilog, содержащий 64-разрядный арифметико-логический блок (ALU), связанный с регистрами общего назначения (GPRS). Разработанный ALU поддерживает 16 логических операций с двумя 64-разрядными операндами, управляемыми 4-разрядным сигналом ALU_Control. Модуль GPRS предназначен для считывания значений операндов и сохранения результатов операций в блоке ALU. Размер массива регистров составляет 32 × 64 бит.

Основная задача – создание моделей машинного обучения, которые могут точно прогнозировать мощность утечки для разных сценариев PVT (давление – объем – температура), таких как различные значения напряжения питания V_{dd}, температуры, рабочих частот и порогового напряжения V_{th} транзисторов, используемых в библиотеках стандартных ячеек. Мощность утечки зависит от порогового напряжения транзистора: чем оно выше, тем меньше мощность утечки, и наоборот. Выбраны библиотеки стандартных ячеек с различными значениями порогового напряжения: стандартное пороговое напряжение (SVT), низкое пороговое напряжение (LVT) и суперпизкое пороговое напряжение (SLVT). Для представления порогового напряжения в наборе данных использовано цифровое обозначение, где 1 – это SVT, 2 – это LVT, 3 – это SLVT.

Технологический процесс FF (быстрые транзисторы *n*-типа и *p*-типа) выбран для всех библиотек как худший с точки зрения энергопотребления. Данные входные параметры могут быть расширены с использованием большего количества параметров технологического разброса, напряжения, температуры (PVT), требуемых частот и порогового напряжения. Неравномерное распределение параметров выбрано для демонстрации возможности машинного обучения моделей с разбросом в данных, что доказывает эффективность предложенного метода для конкретного набора сценариев.

Для прогнозирования мощности утечки после проектирования топологии и моделирования схемы на уровне вентилей на этапе планировки физического проектирования необходимо реализовать весь маршрут проектирования для разработанного описания на уровне регистровых передач (RTL). На рис. 1 показаны реализованные этапы маршрута проектирования.

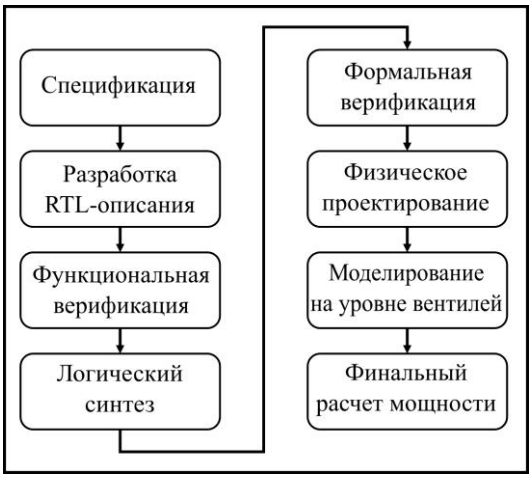


Рис. 1. Основные этапы проектирования ИС
Fig. 1. Main steps of IC design flow

Основные этапы проектирования реализованы с использованием инструментов компании Synopsys: VCS [6] – для проверки функциональности схемы, а также для моделирования схемы на различных уровнях описания; Design Compiler [7] – для логического синтеза; Formality [8] – для формальной верификации RTL-описания и описания на вентильном уровне, полученном после логического синтеза; IC Compiler II [9] – для физического проектирования; StarRC [10] – для экстракции паразитных параметров; PrimeTime [11] – для расчета итогового потребления мощности. Тестовые модули на языке Verilog для функциональной верификации и моделирования описаний на различных уровнях сгенерированы случайным образом в зависимости от частот тактовых синхросигналов с использованием языка Python. Логический синтез реализован для 54 устройств с ограничениями, разработанными с применением всех комбинаций входных параметров (табл. 1) и соответствующих библиотек стандартных ячеек. Кроме того, для всех проектов проведена формальная верификация, чтобы убедиться в отсутствие неожиданных изменений после логического синтеза.

Таблица 1

Входные параметры

Table 1

Input features

Параметр	Значение	Источник
Напряжение питания, В	0,825; 0,935	Сценарий PVT
Температура, °С	–40; 0; 125	
Частота, ГГц	2; 2,67; 4	Ограничения
Пороговое напряжение V_{th}	1; 2; 3	Библиотека
Утилизация	0,15; 0,3; 0,45	Планировка
Соотношение сторон	1:1; 1:2; 1:3	

На этапе физического проектирования добавляются еще два параметра для создания набора данных. Первый – утилизация разрабатываемого блока. Это значение определяет плотность размещения стандартных ячеек в площади ядра чипа. Использованы следующие значения утилизации блоков: 0,15; 0,3; 0,45; 0,6. Параметр утилизации блока рассчитывается по формуле

$$Утилизация = \sum \frac{Площадь\ ячеек\ из\ описания\ на\ уровне\ вентилей}{Площадь\ ядра}.$$

Второй параметр – соотношение сторон ядра, которое определяет форму чипа. Для подготовки набора данных выбраны следующие соотношения сторон: 1:1, 1:2 и 1:3. В общей сложности размещение и трассировка с последующим размещением заполняющих и DCAP-ячеек (Decoupling CAP Cells) реализованы для 486 блоков. Пример схемы после логического синтеза и топологии для проектируемого устройства показан на рис. 2.

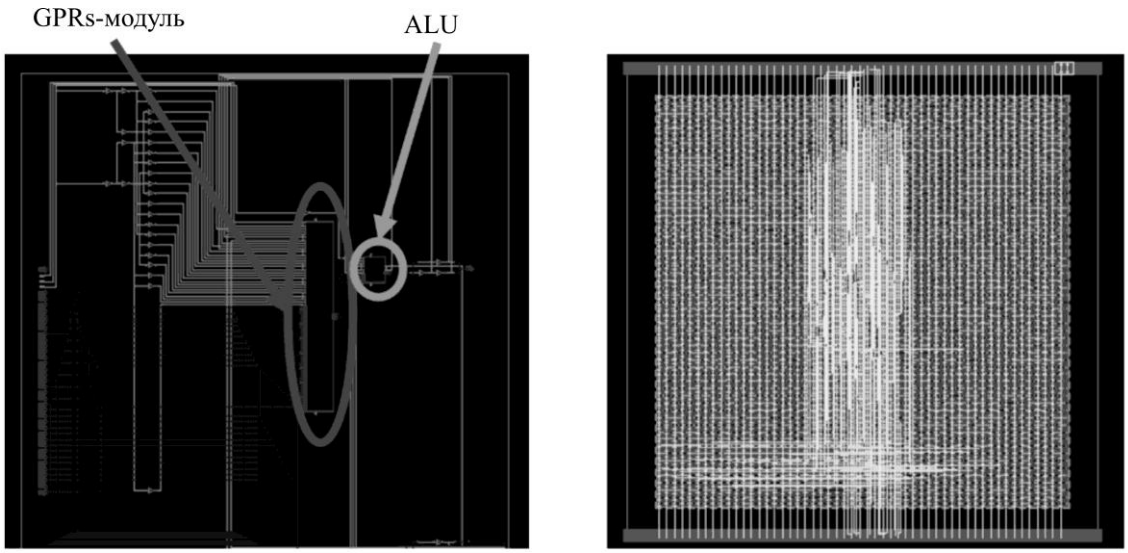


Рис. 2. Вид (*а*) и компоновка (*б*) схемы с соотношением сторон 1:1
Fig. 2. Schematic view (*a*) and layout (*b*) of the scheme with 1:1 aspect ratio

Далее выполнена физическая верификация для каждого спроектированного блока. Следует убедиться, что результаты проверок на соблюдение правил проектирования (DRC), а также сопоставление топологии со схемой (LVS) не должны содержать нарушений. После этого выполнена экстракция паразитных параметров и их сохранение в SPEF-формате для каждого проекта. Для каждого блока смоделированы полученные после физического проектирования описания на уровне вентилей с использованием случайно сгенерированных тестовых модулей на основе тактовых частот. Результаты сохранены в формате VCD для хранения информации об активности переключений сигналов в устройствах. Эта информация необходима для учета точных логических состояний на входах стандартных ячеек в течение определенного времени при расчете мощности.

Затем вычислена мощность утечки с помощью встроенного инструмента расчета мощности PrimePower в PrimeTime с учетом полученных файлов SPEF и VCD для получения реалистичных результатов энергопотребления спроектированных блоков для каждой конфигурации. С помощью инструмента PrimeTime значения мощности утечки могут рассчитываться для разных групп ячеек вместо одного общего значения мощности утечки, что облегчает проведение анализов. Инструмент сообщает значения мощности в ваттах для комбинационной логики, регистров, последовательной логики и ячеек в сети тактового синхросигнала, которые и были собраны в набор входных данных для моделей машинного обучения (см. табл. 1). Количество ячеек и количество межсоединений также предполагалось использовать в качестве входных параметров. Но поскольку архитектура проектируемого устройства фиксирована, после логического синтеза не было обнаружено существенной вариации этих параметров. Поэтому их влияние на обучение моделей будет незначительным.

Созданный набор данных разделен на случайные обучающие и тестовые подмножества в соотношении 70:30, в результате чего получено 340 обучающих наборов и 146 тестовых наборов. Созданный набор данных имеет широкий спектр значений входных параметров, поэтому существует необходимость в стандартизации данных. Если данные не нормализованы или не выполняется стандартизация, то производительность мо-

дели машинного обучения в целом может снизиться и более большие числа могут доминировать при обучении модели. В работе стандартизация, или нормализация Z-score, использована в качестве метода масштабирования для набора, который рассчитывается по формуле

$$z = \frac{x - u}{s},$$

где u – среднее значение обучающих выборок; s – стандартное отклонение обучающих выборок.

Масштабирование выполняется независимо для каждого входного параметра, но выходные значения не масштабируются. Среднее значение и стандартное отклонение сохраняются для последующего масштабирования тестовых данных.

Алгоритмы обучения. Для нахождения модели с наилучшей производительностью для созданного набора данных протестировано и сравнено несколько алгоритмов обучения.

Для тестирования выбраны линейные модели вследствие их вычислительной эффективности по сравнению с другими алгоритмами. Алгоритмы регрессии позволяют прогнозировать результаты с непрерывными значениями, которые связаны с независимыми входными параметрами. Простая модель линейной регрессии с n-мерными входными параметрами имеет вид

$$Y = w_0 + w_1 x_1 + ... + w_n x_n,$$

где Y – прогнозируемое значение; $w = (w_0, ..., w_n)$ – коэффициенты; $x = (x_1, ..., x_n)$ – набор входных параметров.

В случае созданного набора данных стандартная модель линейной регрессии не подходит, так как в данных присутствует нелинейность. Существует несколько алгоритмов для решения задач нелинейной регрессии. Наилучшая производительность созданного набора данных получена для моделей полиномиальной регрессии.

Полиномиальная регрессия – это линейная модель, позволяющая также работать с нелинейными данными. Это свойство может быть достигнуто путем обновления списка входных объектов добавлением их полиномов. Таким образом, в случае двух входных функций x_1 и x_2 обновленный набор входных данных будет выглядеть так:

$$Z = \left[x_1, x_2, x_1 x_2, x_1^2, x_2^2 \right].$$

Модель полиномиальной регрессии с обновленными входными функциями имеет вид

$$Y = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_1 x_2 + w_4 x_1^2 + w_5 x_2^2.$$

Полиномиальная регрессия может поддерживать различные типы кривизны в зависимости от степени полиномов. Чем выше степень, тем больше поддерживаемая степень кривизны, но слишком высокая степень многочленов может привести к переобучению модели. В этом случае модель покажет высокую производительность на обучающем наборе, но на тестовых наборах производительность будет неудовлетворительной.

Многослойный персептрон (Multilayer Perceptron, MLP) – это алгоритм обучения с учителем, а также структура нейронной сети, которая использует обратное распространение для обучения модели (рис. 3). Крайний левый слой называется входным слоем с нейронами для соответствующих входных объектов, последний выходной слой – это прогнозируемые значения. Между ними есть скрытые слои. Каждый нейрон в скрытых

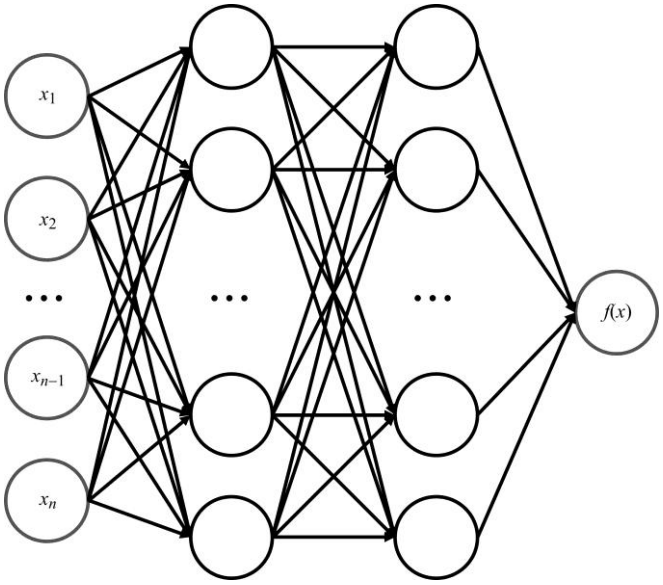


Рис. 3. Структура нейронной сети
Fig. 3. Example of multilayer perceptron structure

слоях получает сумму взвешенных значений с предыдущего слоя, после чего используется нелинейная функция активации каждого нейрона. Количество скрытых слоев и нейронов в них может варьироваться в зависимости от архитектуры сети. Количество входных и выходных нейронов соответствует количеству входов и необходимых выходов.

Экспериментальные результаты. Прогнозирование конечной мощности утечки на этапе планировки чипа является довольно сложной задачей из-за отсутствия многих входных данных, таких как размещение стандартных ячеек и длина межсоединений, оказывающих непосредственное влияние на искомое значение. Подобные задачи решаются с помощью машинного обучения.

Прогнозирование мощности утечки устройства проведено для четырех групп ячеек: комбинационной, регистровой, последовательной и сети тактового синхросигнала. Такое разделение облегчает анализ спроектированной схемы, а также процесс оптимизации. Таким образом, для прогнозирования общей мощности утечки на этапе планировки чипа необходимо разработать четыре различные модели.

После обучения модели ее необходимо протестировать на тестовом наборе данных для анализа производительности. Существует несколько показателей, помогающих понять производительность модели в тренировочных или тестовых наборах: максимальная остаточная ошибка (Maximum Residual Error, MRE), средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE), средняя квадратичная ошибка (Mean Squared Error, MSE), коэффициент детерминации или оценка R^2 (R-squared), средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) и т. д. Оценка R^2, MAPE и MSE используются в настоящей работе для анализа и сравнения производительности моделей. Данные показатели взяты из библиотеки Scikit-Learn [12].

Выходное значение – это прогнозируемое значение мощности утечки для каждой группы ячеек с учетом оптимизации схемы, топологии, паразитики и переключательной активности блока. Входные параметры (температура, напряжение питания, пороговое напряжение V_{th} библиотек, утилизация блоков, соотношение сторон и тактовая частота) не содержат никаких технологически зависимых данных. Поэтому предложенный

подход обучения моделей машинного обучения на основе приведенных входных данных может использоваться с различными технологическими узлами.

Сначала для каждой группы ячеек применяли алгоритм полиномиальной регрессии. Выбор этого алгоритма обусловлен поддержкой нелинейности в данных с относительно меньшими требуемыми вычислительными ресурсами. В ходе экспериментов получено по четыре модели для каждой группы ячеек с наилучшими показателями. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты применения моделей полиномиальной регрессии и нейронных сетей

Table 2

The performance of polynomial regression and neural network models for each cell group

Группа ячеек	Регистры		Комбинационные ячейки		Последовательные ячейки		Сеть синхросигнала	
Набор данных	Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test
Модели полиномиальной регрессии								
Оценка R^2	0,9983	0,9976	0,9996	0,9985	0,9999	0,9999	0,9929	0,6926
MAPE, %	0,0628	0,1107	182,2629	136,4364	68,6562	120,4627	1478,0117	3593,2364
MSE (nW)	4,4458	22,9142	14387,9867	28545,8122	41,0202	67,5496	916,0573	5894,2180
Модели нейронных сетей								
Оценка R^2	0,9999	0,9999	0,9994	0,9992	0,9999	0,9999	0,9684	0,8678
MAPE, %	0,0180	0,0224	5,5813	5,8315	0,01476	0,0154	39,3923	39,3323
MSE (nW)	10,0665	12,7944	16538,8116	20541,9345	2,0648	2,8709	1842,7173	3678,3087

В случае алгоритмов полиномиальной регрессии решающим параметром, влияющим на производительность модели, является степень полиномов. Для комбинационных ячеек и ячеек в сети тактового синхросигнала наилучшая производительность в наборе проверки получена с использованием полиномов третьей степени. В случае последовательных ячеек и регистров модели с четвертой степенью полиномов показали наилучшую производительность. Более высокие степени приводят к переобучению моделей.

Как видно из табл. 2, оценка R^2 почти равна 1. Это означает, что модели полиномиальной регрессии имеют достаточно высокую точность соответствия данным. Но MAPE показывает, что существует заметное отклонение от реального количества потребляемой мощности утечки. Для ячеек регистра полученные результаты удовлетворительны (MAPE для тестового набора составляет всего ~ 0,1 %). В случае остальных групп ячеек этот параметр необходимо оптимизировать. Наихудший показатель имеют ячейки сети тактового синхросигнала, так как на этапе планировки нет подробной информации о дереве синхросигнала. Для оптимизации MAPE протестированы нейронные сети.

Основной мотивацией использования нейронных сетей является минимизация метрики MAPE для получения более точного прогноза мощности утечки и сравнения с результатами моделей полиномиальной регрессии. В отличие от моделей полиномиальной регрессии нейронные сети более гибкие в настройке и выборе параметров, но требуют гораздо большего времени для обучения и верификации. Нейронные сети разработаны путем настройки количества нейронов в слое, количества скрытых слоев, коэффициента скорости обучения, а также путем выбора функции активации нейронов и оптимизатора. Количество эпох одинаково для всех моделей и равно 1 000 000. Библиотека Scikit-Learn [12] для Python используется с целью реализации моделей машин-

ного обучения. Достигнутые результаты для каждой группы ячеек с нейтронной сетью показаны в табл. 2. Настроенные параметры моделей нейронной сети, с помощью которых получены данные результаты, представлены в табл. 3. Функция активации relu и оптимизатор lbfg выбраны для всех моделей на основе экспериментальных результатов.

Таблица 3

Настроенные параметры нейронной сети

Table 3

Tuned parameters for neural network models

Параметр	Регистры	Комбинационные ячейки	Последовательные ячейки	Сеть синхросигнала
Количество скрытых слоев	13	6	9	5
Количество нейронов в скрытых слоях	14	11	20	17
Альфа	0,0001	0,0001	0,0001	0,001

Таким образом, нейронные сети обеспечивают лучшие результаты по сравнению с алгоритмом полиномиальной регрессии даже в случае регистров, где результаты, полученные с помощью регрессии, неплохие (см. табл. 2). Основная трудность заключается в прогнозировании мощности утечки для ячеек в сети тактового синхросигнала. На этапе планировки физического проектирования недостаточно данных для описания дерева синхросигнала. Также отсутствует и начальное неоптимизированное размещение стандартных ячеек. Несмотря на это, модели дают хороший результат. В табл. 4 показано сравнение метрики MAPE для прогнозируемых значений и значений, полученных из отчетов с использованием IC Compiler II на этапе планировки чипа без предоставления информации о переключательной активности в устройстве.

Таблица 4

Показатель MAPE для прогнозируемых значений и значений, полученных с использованием IC Compiler II

Table 4

MAPE comparison for predicted values and values obtained using IC Compiler II

Группа ячеек	MAPE, %	
	для значений из IC Compiler II	для прогнозируемых значений
Регистры	3,2856	0,0224
Комбинационные	10,9518	5,8315
Последовательные	0,8030	0,0154
Сеть синхросигнала	92,6747	39,3323

Заключение. Применение подхода, основанного на машинном обучении, для прогнозирования мощности утечки для различных групп ячеек на этапе планировки физического проектирования показало следующее. Отчет по группам дает возможность анализировать мощность утечки по компонентам и легко выявлять источники нарушений, если таковые имеются, что позволит сократить количество итераций в маршруте проектирования.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенного метода. Средняя ошибка в процентах для последовательных ячеек составляет ~ 0,01 %, для регистровых ячеек ~ 0,02 %, для комбинационных ячеек ~ 5,83 %, для сети тактового синхросигнала ~ 39,33 %.

Литература

1. ***Wang L., Luo M.*** Machine learning applications and opportunities in IC design flow // 2019 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). Hsinchu: IEEE, 2019. P. 1–3. https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT.2019.8742073

2. ***Li B., Franzon P. D.*** Machine learning in physical design // 2016 IEEE 25th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS). San Diego, CA: IEEE, 2016. P. 147–150. https://doi.org/10.1109/EPEPS.2016.7835438

3. ***Barboza E. C., Shukla N., Chen Y., Hu J.*** Machine learning-based pre-routing timing prediction with reduced pessimism // 2019 56th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC). Las Vegas, NV: IEEE, 2019. P. 1–6.

4. ***Bai L., Chen L.*** Machine-learning-based early-stage timing prediction in SoC physical design // 2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). Qingdao: IEEE, 2018. P. 1–3. https://doi.org/10.1109/ICSICT.2018.8565778

5. ***Gourishetty S., Mandadapu H., Zahra A., Abbas Z.*** A highly accurate machine learning approach to modelling PVT variation aware leakage power in FinFET digital circuits // 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). Bangkok: IEEE, 2019. P. 61–64. https://doi.org/10.1109/APCCAS47518.2019.8953073

6. VCS user guide // Synopsys Inc. [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (дата обращения: 03.10.2022).

7. Design compiler user guide // Synopsys Inc. [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (дата обращения: 03.10.2022).

8. Formality user guide // Synopsys Inc. [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (дата обращения: 03.10.2022).

9. IC compiler II design planning user guide // Synopsys Inc. [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (дата обращения: 03.10.2022).

10. StarRC user guide and command reference // Synopsys Inc. [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (дата обращения: 03.10.2022).

11. PrimeTime user guide // Synopsys Inc. [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (дата обращения: 03.10.2022).

12. Scikit-learn: machine learning in Python / ***F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort et al.*** // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. No. 85. P. 2825–2830.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022 г.; одобрена после рецензирования 02.08.2022 г.;
принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Джанполадов Вахтанг Арташесович – аспирант кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер физического проектирования интегральных схем ЗАО «Синопсис Армения» (Армения, 0026, Ереван, пр-т Аршакуняц, 41), vakhtang.janpoladov@gmail.com

Гаврилов Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, директор Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), заведующий кафедрой проектирования и конструирования интегральных схем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), s.g@ippm.ru

References

1. Wang L., Luo M. Machine learning applications and opportunities in IC design flow. *2019 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT).* Hsinchu, IEEE, 2019, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT.2019.8742073

2. Li B., Franzon P. D. Machine learning in physical design. *2016 IEEE 25th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS).* San Diego, CA, IEEE, 2016, pp. 147–150. https://doi.org/10.1109/EPEPS.2016.7835438

3. Barboza E. C., Shukla N., Chen Y., Hu J. Machine learning-based pre-routing timing prediction with reduced pessimism. *2019 56th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC).* Las Vegas, NV, IEEE, 2019, pp. 1–6.

4. Bai L., Chen L. Machine-learning-based early-stage timing prediction in SoC physical design. *2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT).* Qingdao, IEEE, 2018, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/ICSICT.2018.8565778

5. Gourishetty S., Mandadapu H., Zahra A., Abbas Z. A highly accurate machine learning approach to modelling PVT variation aware leakage power in FinFET digital circuits. *2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS).* Bangkok, IEEE, 2019, pp. 61–64. https://doi.org/10.1109/APCCAS47518.2019.8953073

6. VCS user guide. *Synopsys Inc.* 2021. Available at: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (accessed: 03.10.2022).

7. Design compiler user guide. *Synopsys Inc.* 2021. Available at: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (accessed: 03.10.2022).

8. Formality user guide. *Synopsys Inc.* 2021. Available at: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (accessed: 03.10.2022).

9. IC compiler II design planning user guide. *Synopsys Inc.* 2021. Available at: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (accessed: 03.10.2022).

10. StarRC user guide and command reference. *Synopsys Inc.* 2021. Available at: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (accessed: 03.10.2022).

11. PrimeTime user guide. *Synopsys Inc.* 2021. Available at: https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html (accessed: 03.10.2022).

12. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P. et al. Scikit-learn: machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research,* 2011, vol. 12, no. 85, pp. 2825–2830.

The article was submitted 19.07.2022; approved after reviewing 02.08.2022; accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Vakhtang A. Janpoladov – PhD student of the Design and Construction of Integrated Circuits Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of Physical Design of Integrated Circuits, “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), vakhtang.janpoladov@gmail.com

Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), Head of the Design and Construction of Integrated Circuits Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), s.g@ippm.ru

Научная статья
УДК 621.3.049.771.14:621.3.062:[658.512:004]
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-774-786

Решение задачи трассировки на ПЛИС с применением модели расширенного смешанного графа коммутационных ресурсов

М. А. Заплетина

Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия

zapletina_m@ippm.ru

Аннотация. Архитектурно-ориентированная модель расширенного смешанного коммутационного графа позволяет описать особенности трассировочных ресурсов современных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Такая модель может применяться для решения задачи трассировки проектных межсоединений в составе маршрута топологического проектирования на основе ПЛИС. В работе рассмотрена архитектурно-ориентированная модель расширенного смешанного коммутационного графа. Предложены две модификации базового метода автоматической трассировки – классического алгоритма Pathfinder, адаптированного к смешанному графу коммутационных ресурсов. Первая модификация построена на применении идеи направленного поиска на графовой модели с использованием данных о пространственно-геометрических характеристиках базового кристалла, вторая – сочетает стратегию направленного поиска с учетом предварительной оценки перегруженности коммутационных ресурсов ПЛИС по результатам процедуры размещения. Показано, что предложенные модификации позволяют ускорить сходимость базового метода к трассировочному решению в среднем на 50,6 и 38,6 % соответственно. При сохранении полной трассируемости тестовых наборов IWLS'2005, ISCAS'89 и LGSynth'89 применение только направленного поиска привело к улучшению временных характеристик имплементаций проектных схем на 5,2 % в среднем, а использование его совместно с оценкой перегруженности перед началом трассировки позволило улучшить их на 9,3 % в среднем относительно результатов базового метода Pathfinder.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, островная архитектура, топологический синтез, Pathfinder, автоматизация проектирования

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20–37–90046).

Для цитирования: Заплетина М. А. Решение задачи трассировки на ПЛИС с применением модели расширенного смешанного графа коммутационных ресурсов // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 774–786. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-774-786

© М. А. Заплетина, 2022

Original article

Solving the FPGA routing problem using the model of an extended mixed routing graph

M. A. Zapletina

Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

zapletina_m@ippm.ru

Abstract. An architecture-aware extended mixed routing graph model allows describing the features of the routing resources of modern field-programmable gate arrays (FPGA). It can be used to solve the tasks of interconnections routing as part of an FPGA layout synthesis flow. In this work, an architecture-aware extended mixed routing graph model is considered. Two modifications are proposed for the basic method of automatic routing that is the classical Pathfinder algorithm adapted to a mixed routing resources graph. The first modification is based on the idea of a directed search on the graph model using data on the spatial and geometric characteristics of the basic FPGA chip, while the second one combines a directed search strategy with consideration of a preliminary routing congestion assessment based on the results of the placement procedure. It has been demonstrated that the proposed modifications make it possible to accelerate the basic method convergence by an average of 50.6 and 38.6 %, respectively. While maintaining the routability of IWLS'2005, ISCAS'89 and LGSynth'89 benchmark suits, the use of only directed search led to an improvement in the timing characteristics of test circuits implementations by 5.2 % on average, and its use together with an assessment of congestion before the start of routing, to these characteristics improvement by 9.3 % on average relative to the results of the basic Pathfinder method.

Keywords: field-programmable gate array, island-style architecture, layout synthesis, Pathfinder, computer-aided design

Funding: the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20–37–90046).

For citation: Zapletina M. A. Solving the FPGA routing problem using the model of an extended mixed routing graph. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 774–786. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2022-27-6-774-786

Введение. Базовое архитектурное свойство реконфигурируемости программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) по сравнению со схемами заказного проектирования обеспечивает ряд преимуществ. К ним относятся короткий цикл проектирования и высокая скорость реализации проектной функциональности, возможность многократного и многоцелевого применения базовой программируемой схемы, относительно низкая стоимость конечного пользовательского устройства при малых и средних объемах производства. Перечисленные преимущества обусловливают основные направления применения ПЛИС для разработки современных микро- и наноэлектронных устройств: прототипирование проектов для полузаказного (базовые матричные кри-

сталлы) и заказного проектирования, имплементация коммутационных матриц и иных блоков в составе реконфигурируемых вычислительных систем, решение утилитарных задач машинного обучения, шифрование данных и др.

Маршрут топологического проектирования СБИС на ПЛИС основывается на результатах процедур логического синтеза и декомпозиции описания необходимой проектной функциональности и включает в себя два этапа: размещение и трассировку. Результатом этапа размещения является карта расстановки логических элементов проектируемой схемы на базовом кристалле ПЛИС, оптимизированная по критериям длины и задержки проектных межсоединений, их разводимости, показателям энергоэффективности и мощности схемы и др. Этап трассировки выполняется на основе данных размещения и отвечает за имплементацию межсоединений проектной схемы в соответствии с заданными ограничениями.

Трассировка, как правило, является наиболее времязатратным этапом в маршруте физического проектирования на основе ПЛИС. С одной стороны, назначение этого класса схем требует их быстрой настройки на выполнение новых функций, что налагает жесткие ограничения на длительность этапа трассировки. С другой стороны, классические модели и методы, применяемые на этапе трассировки, эффективны при использовании на традиционных (островной, древовидной и др.) архитектурах коммутационных сетей ПЛИС. В этих условиях появление новых архитектурных и схемотехнических решений, например использование широкого набора нестандартных трассировочных элементов в схемах и применение неполной матрицы коммутаций для связи логических элементов с каналами трассировки в островной архитектуре ПАЦИС 5400ТР094 ввиду экономии конфигурационной памяти и площади на кристалле, снижает адекватность известных моделей коммутационных ресурсов. Кроме того, сложность решения NP-полной задачи трассировки [1] существующими методами повышается в результате роста степени интеграции кристаллов ПЛИС. В связи с этим разработка новых архитектурно-ориентированных моделей и методов для решения задачи трассировки в маршруте топологического проектирования на основе современных ПЛИС актуальна.

Цель настоящей работы – развитие направления методов [2–7], основанных на модификации классических алгоритмов поиска кратчайшего пути [8–11] и известного метода трассировки Pathfinder [12]. Предлагается архитектурно-ориентированная модель расширенного смешанного графа коммутационных ресурсов, приводится ее сравнение с известными моделями ориентированного и смешанного графов на примере нескольких коммерческих ПЛИС. На основе этой модели с использованием идеи направленного поиска и предварительной оценки перегруженности коммутационных ресурсов ПЛИС разрабатываются две модификации метода Pathfinder для ускоренной трассировки списков проектных цепей. Проводится анализ предложенных модификаций на примере базового кристалла программируемой цифровой части ПАЦИС 5400ТР094 и наборов тестовых схем LGSynth’89 [13], IWLS’2005 и ISCAS’89 [14].

Формализация задачи трассировки на ПЛИС. Для формализации задачи трассировки введем теоретико-множественное описание известной модели смешанного графа [15] трассировочных ресурсов $G = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$, в котором множество вершин $v_i \in \mathbf{V}$ представляет собой электрические коммутируемые узлы базового кристалла ПЛИС, а множество $\mathbf{E} = \mathbf{A} \cup \mathbf{U}$ является объединением множества дуг $a_j = (v_k, v_l)$, $a_j \in \mathbf{A}$, $\mathbf{A} = \mathbf{V} \times \mathbf{V}$, $v_k, v_l \in \mathbf{V}$ для обозначения направленных программируемых коммутационных элементов между двумя узлами и множества ребер $u_j \in \mathbf{U}$ для обозначения двунаправленных

коммутационных элементов. Далее для удобства элементы $e_j \in \mathbf{E}$ именуются ребрами.

После этапа размещения в терминах смешанной графовой модели проектная цепь может быть описана как $n_m = \{s_m, \mathbf{T}_m\}$, где $s_m \in \mathbf{V}$ – источник; $\mathbf{T}_m = \{t_m^k\}$; $\mathbf{T}_m \subset \mathbf{V}$; $k = 1, ..., l$ – множество приемников; $l = |\mathbf{T}_m|$ – число приемников сигнала в цепи n_m. Цепь $n_m \in \mathbf{N}$ из множества уникальных проектных цепей $\mathbf{N}$ является трассируемой, если на графе G в ходе процедуры трассировки для нее может быть найдено не пересекающееся с деревьями других проектных цепей дерево трассировки $\mathbf{RT}(n_m)$, которое определяется как $\mathbf{RT}(n_m) = \{rt^p : rt^p = \{v_m^p, e_m^p\}, v_m^p \in \mathbf{V}(n_m), e_m^p \in \mathbf{E}(n_m)\}$, где $p = 0, ..., |\mathbf{RT}(n_m)| - 1$, и является подмножеством декартова произведения $\mathbf{V}(n_m) \times \mathbf{E}(n_m)$ множества $\mathbf{V}(n_m)$ вершин, принадлежащих цепи, и множества предшествующих им ребер цепи $\mathbf{E}(n_m)$ с корневым элементом $rt^0 = (s_m, \varnothing)$, $rt^0 \in \mathbf{RT}(n_m)$ и листьями $\mathbf{LV}(n_m) = \{rt^k : rt^k = \{t_m^k, e_m^k\}\}$, $\mathbf{LV}(n_m) \subset \mathbf{RT}(n_m)$, $k = 1, ..., |\mathbf{T}_m|$, соответствующими приемникам цепи. Операция пересечения деревьев трассировки может быть определена следующим образом: $\mathbf{RT}(n_i) \cap \mathbf{RT}(n_j) = (\mathbf{V}(n_i) \cap \mathbf{V}(n_j), \mathbf{E}(n_i) \cap \mathbf{E}(n_j))$. Вершина $v_a : v_a \in \mathbf{V}(n_j)$, $v_a \in \mathbf{V}(n_k)$, $n_j \neq n_k$, входящая в состав нескольких деревьев трассировки одновременно, называется перегруженной.

В данной формализации поиск трассировочного решения для схемы сводится к нахождению такой комбинации состава всех трассировочных деревьев, при которой перегруженные вершины отсутствуют:

$$\forall i, j, i \neq j, n_i \in \mathbf{N}, n_j \in \mathbf{N} : \mathbf{RT}(n_i) \cap \mathbf{RT}(n_j) = \{\varnothing, \varnothing\}.$$

Расширенная модель смешанного графа трассировочных ресурсов. Для учета схемотехнических особенностей целевых современных ПЛИС и ввода компоненты перегруженности в целевую функцию алгоритма Pathfinder предлагается расширить смешанную модель описания коммутационных ресурсов за счет информации об их пространственных геометрических характеристиках, в частности ортогональных координатах элементов смешанного графа трассировки $\operatorname{coord} \mathrm{V}(v_i)$: $v_i \to \left(x_{v_i}, y_{v_i}\right)$, $\operatorname{coord} \mathrm{E}(e_j)$: $e_j \to \left(x_{e_j}, y_{e_j}\right)$. В этом случае по завершении процедуры размещения может быть определена перегруженность коммутационного элемента $\mu(e_j)$, рассчитываемая в нормализованном виде по отношению к наиболее перегруженному элементу следующим образом:

$$\mu(e_j) = \sum_{m=1}^{|\mathbf{N}|} \operatorname{cong}\left(e_j, n_m\right) \Big/ \operatorname{cong}_{\max}, \quad \operatorname{cong}_{\max} = \max_{j=1,...,|\mathbf{E}|} \left(\sum_{m=1}^{|\mathbf{N}|} \operatorname{cong}\left(e_j, n_m\right) \right), \tag{1}$$

где функция перегруженности $\operatorname{cong}\left(e_j, n_m\right)$ принимает значение 1 в случае, когда координаты коммутационного элемента e_j лежат внутри охватывающего прямоугольника $\mathbf{BB}(n_m)$ цепи n_m, и может быть определена как

$$\mathrm{cong}\left(e_j, n_m\right) = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad (x_{e_j}, y_{e_j}) \in \mathbf{BB}(n_m), \\ 0 & \text{иначе}, \end{cases} \tag{2}$$

$$\mathbf{BB}(n_m) = \{(x, y):\ x_{n_m}^{\min} \le x \le x_{n_m}^{\max},\ y_{n_m}^{\min} \le y \le y_{n_m}^{\max}\}.$$

Модель охватывающего прямоугольника может быть заменена на другой способ предварительного определения принадлежности коммутационных ресурсов трассировочному дереву $\mathbf{RT}(n_m)$ цепи $n_m \in \mathbf{N}$. Данная модель выбрана как компромиссная с точки зрения скорости и точности оценки расположения и длины цепи согласно анализу результатов существующих научных исследований, например для случая трассировки заказных схем [16], и результатов экспериментов, проведенных в рамках данной работы.

Максимальное расчетное значение $\mu(e_j)$ равно единице для наиболее перегруженных трассировочных элементов ПЛИС. Значения $\mu(e_j)$ для всех ребер расширенного смешанного графа трассировочных ресурсов позволяют сформировать карту перегруженности коммутационных ресурсов $\mathrm{congMap}(\mathbf{E}) = \{(x(e_j), y(e_j), \mu(e_j))\}$, $j = 1,...,|\mathbf{E}|$, которая используется для одной из предлагаемых модификаций метода Pathfinder.

В отличие от классической модели ориентированного графа [4] предлагаемая расширенная смешанная модель не содержит избыточности, возникающей при описании двунаправленных трассировочных элементов, и значительно точнее описывает имеющиеся архитектурные особенности целевых ПЛИС, позволяя учесть их геометрические свойства. Согласно расчетам на примере четырех коммерческих ПЛИС (табл. 1) при реализации [17] объем оперативной памяти, занимаемый моделью, не более чем на 17,2 % превышает объем, необходимый для традиционного орграфа. Расчеты приведены для 64-битной версии САПР для реализации маршрута проектирования [17], где 84 байт задействовано для хранения объекта структуры вершины графа, 64 байт и 88 байт для расширенной модели – для хранения объекта структуры ребра.

Таблица 1

Расчетные объемы памяти компьютера, занимаемой классической, смешанной и предложенной расширенной смешанной графовой моделью

Table 1

The comparison of calculated memory volume required for storage of classical, mixed and extended mixed graph models

Код ПЛИС	Объем памяти, Мб			Разница, %	
	Классическая модель орграфа	Модель смешанного графа	Расширенная модель смешанного графа, Мб	классическая / смешанная	классическая / расширенная
I	33,57	26,25	32,79	–21,81	–2,32
II	1043,58	893,00	1140,00	–14,43	+9,24
III	358,29	323,56	412,98	–9,69	+15,26
IV	182,83	171,45	214,29	–6,22	+17,21

Примечание: число вершин в трех графовых моделях одинаково для выбранного кристалла ПЛИС: 109 700 для I; 714 048 для II; 1 062 445 для III; 2 925 409 для IV.

С помощью методов трассировки, представленных в [5], для архитектуры блока ПЛИС ПАЦИС 5400ТР094 с элементами архитектуры островного типа найдено, что используемые трассировочные ресурсы для 60 % цепей в составе проектных схем (тестовых наборов IWLS'2005 [14], ITC'99 [18] и LGSynth'89 [13]) лежат полностью внутри охватывающих прямоугольников этих цепей. При этом в среднем 79 % коммутационных элементов расположены внутри границ охватывающего прямоугольника разведенной цепи. Более детальные данные представлены в табл. 2.

Повышение доли трассировочных элементов e_j с $\mathrm{cong}\left(e_j, n_m\right)=1$ до 89 % достигнуто в результате искусственного расширения охватывающих прямоугольников пропорционально вертикальной H_{CLB} и горизонтальной W_{CLB} архитектурным константам для трех типов цепей. К первому типу отнесены цепи, у которых одним из терминалов (источником или приемником) является ячейка ввода-вывода, а оставшиеся терминалы размещены в ближайшем ряду или столбце логических элементов. Ко второму типу отнесены двухтерминальные цепи, соединяющие логические элементы в составе одного программируемого логического блока CLB (рисунок) и имеющие пренебрежимо малый охватывающий прямоугольник. К третьему типу отнесены двухтерминальные цепи, соединяющие логические ячейки, находящиеся в одном ряду или столбце и имеющие пренебрежимо малую высоту или ширину охватывающего прямоугольника.

В первом случае охватывающий прямоугольник цепи расширялся на величину, равную сумме высоты H_{CLB} и ширины W_{CLB} программируемого логического блока ПЛИС:

$$\mathbf{BB}^1{}_{corr}(n_m)=\{(x,y):$$
$$x_{n_m}^{\min}-\frac{1}{2}W_{\mathrm{CLB}}\le x\le x_{n_m}^{\max}+\frac{1}{2}W_{\mathrm{CLB}},\ y_{n_m}^{\min}-\frac{1}{2}H_{\mathrm{CLB}}\le y\le y_{n_m}^{\max}+\frac{1}{2}H_{\mathrm{CLB}}\}.$$

Во втором случае охватывающий прямоугольник цепи расширялся до размера области, включающей в себя программируемый логический блок с источником и приемником цепи, а также ближайшие к нему коммутационные блоки типов SB и CB:

$$\mathbf{BB}^2{}_{corr}(n_m)=\{(x,y):$$
$$x_{n_m}^{\min}-12W_{\mathrm{CLB}}\le x\le x_{n_m}^{\max}+3W_{\mathrm{CLB}},\ y_{n_m}^{\min}-\frac{1}{2}H_{\mathrm{CLB}}\le y\le y_{n_m}^{\max}+4H_{\mathrm{CLB}}\}.$$

В третьем случае охватывающий прямоугольник цепи расширялся в направлении параметра, имеющего пренебрежимо малое значение. Так, если $x_{n_m}^{\max}-x_{n_m}^{\min}\le W_{\mathrm{CLB}}$, то

$$\mathbf{BB}^3{}_{corr}(n_m)=\{(x,y):$$
$$x_{n_m}^{\min}-12W_{\mathrm{CLB}}\le x\le x_{n_m}^{\max}+3W_{\mathrm{CLB}},\ y_{n_m}^{\min}-\frac{1}{4}H_{\mathrm{CLB}}\le y\le y_{n_m}^{\max}+\frac{1}{2}H_{\mathrm{CLB}}\}.$$

Если $y_{n_m}^{\max}-y_{n_m}^{\min}\le H_{\mathrm{CLB}}$, то

$$\mathbf{BB}^3{}_{corr}(n_m)=\{(x,y):$$
$$x_{n_m}^{\min}-12W_{\mathrm{CLB}}\le x\le x_{n_m}^{\max},\ y_{n_m}^{\min}-\frac{1}{2}H_{\mathrm{CLB}}\le y\le y_{n_m}^{\max}+4H_{\mathrm{CLB}}\}.$$

Таблица 2

Результаты анализа трассировочных деревьев цепей некоторых тестовых схем из наборов IWLS'2005 и LGSynth'89, разведенных на блоке ПЛИС ПАЦИС 5400ТР094

Table 2

The results of nets' routing trees analysis for some test circuits of IWLS'2005 and LGSynth'89 benchmarks routed in an FPGA part of PADIC 5400TP094

Схема	Доля трассировочных элементов, %		
	внутри **BB**(n_m) без учета μ(e_j) при трассировке	внутри расширенного **BB**(n_m) без учета μ(e_j) при трассировке	внутри расширенного **BB**(n_m) с учетом μ(e_j) при трассировке
1	2	3	4
c499	79,60	89,11	90,01
c880	77,50	91,88	89,12
c1355	82,20	93,08	92,77
c1908	78,30	90,79	88,15
c3540	83,54	91,56	91,71
c6288	68,35	91,39	91,42
arbiter	74,79	89,75	89,49
b05	82,91	90,74	90,06
b07	78,48	87,84	87,20
b11	81,16	87,17	86,61
b12	79,09	88,68	89,09
b13	83,35	89,13	89,49
i2c	78,47	89,12	87,13
misex3	78,91	86,54	85,94
s382	74,05	87,56	85,47
s400	81,09	86,93	84,35
s420	78,90	88,44	82,91
s444	75,85	85,13	87,38
s510	76,95	89,35	87,02
s641	73,03	90,02	89,60
s713	78,06	90,08	87,78
s820	76,92	89,37	87,12
s832	80,22	87,97	89,11
s1238	78,41	89,74	88,04
s1423	78,15	87,92	87,47
s1488	77,47	87,35	86,44
s1494	78,70	87,39	90,65
s5378	80,31	91,31	91,37
s13207	84,44	92,63	89,61
sasc_top	84,26	92,70	89,68
simple_spi	82,36	91,15	85,11
ss_pcm	77,25	89,15	88,14
synchronizer	80,08	87,94	88,66
test_4	79,38	88,98	90,00
uart_block	79,30	92,21	82,06
usb_phy	76,65	83,48	90,97
vda_synth	75,90	90,81	93,60
Среднее	78,70	89,19	88,13
Медиана	78,48	89,14	88,15
10 процентиль	75,17	86,55	85,15
90 процентиль	82,86	92,19	91,35

Примечание: данные столбцов 2 и 3 получены с помощью алгоритмов трассировки из работы [5] без использования направленного поиска.

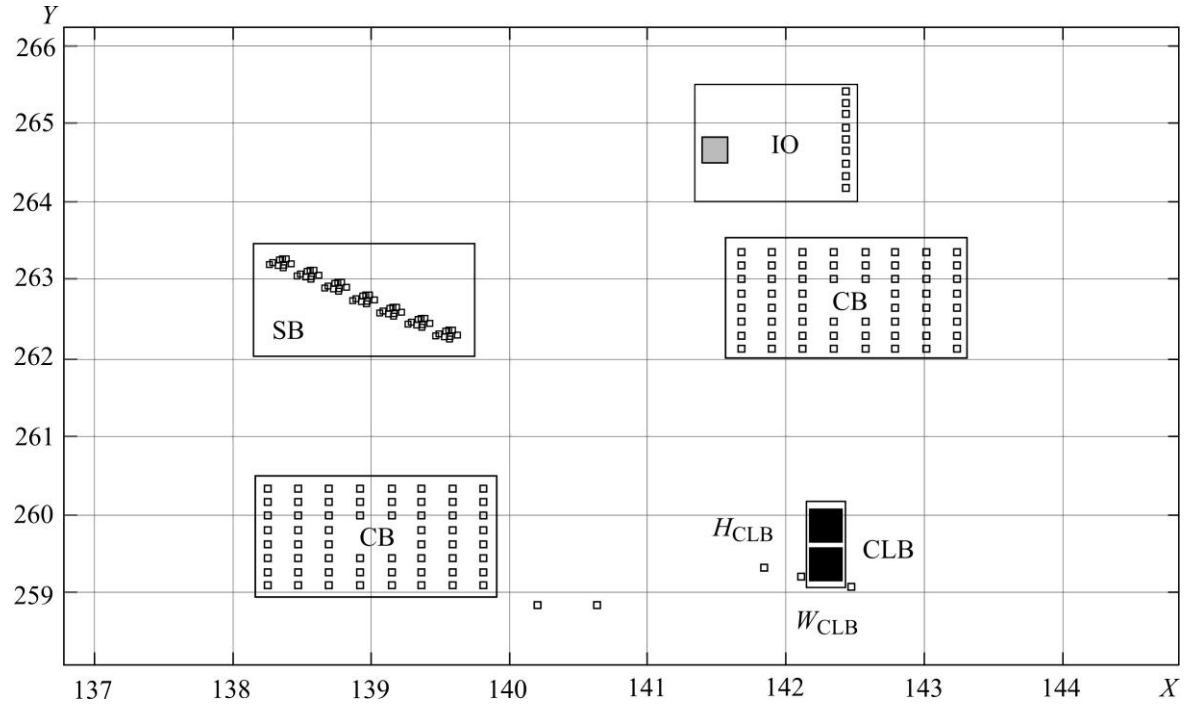


Схема фрагмента блока ПЛИС ПАЦИС 5400ТР094, построенная на основе используемых координат (CLB – программируемый логический блок из двух логических ячеек; SB, CB – два вида блоков коммутации; IO – блок ячейки ввода-вывода; точки – контуры трассировочных элементов)

A scheme of a fragment of FPGA part of PADIC 5400TP094 built by the coordinates used (CLB – a configurable logic block consisted of two logic cells; SB, CB – two types of switching boxes; IO – the block of the I / O cell; dots – mark the routing elements)

Искусственные преобразования над охватывающими прямоугольниками цепей после процедуры размещения в общем случае могут быть нежелательны по причине возможной некорректной оценки перегруженности относящихся к ним коммутационных ресурсов. Однако в перечисленных случаях негативный эффект сведен к минимуму благодаря учету структурных свойств базового кристалла целевой ПЛИС.

Модификации метода Pathfinder для ускоренной автоматической трассировки. Первая модификация метода Pathfinder основана на использовании стратегии направленного поиска [5]. Для ее реализации применяется нормализованная оценка расстояния от ребра, ведущего к текущей рассматриваемой вершине v_i, до ближайшего приемника цепи t_m^j, путь до которого еще не трассирован.

Стандартная формула алгоритма Pathfinder для расчета стоимости вхождения элемента $rt_i = (v_i, e_i)$ в дерево трассировки $\mathbf{RT}(n_m)$ имеет вид

$$\text{cost}(rt_i) = \text{cost}_{hist}^i + c(v_i), \tag{3}$$

где cost_{hist}^i – накопленная стоимость элементов трассировочного дерева, предшествующих rt_i в строящемся дереве трассировки; $c(v_i)$ – обновляемый вес вершины v_i, зависящий от номера текущей итерации, настроечных коэффициентов алгоритма Pathfinder и числа деревьев трассировки, которым на прошлой итерации принадлежала эта вершина.

После преобразования формулы (3) имеем

$$\text{cost}(rt_i) = \text{cost}^i_{hist} + c(v_i) + \alpha w(e_i) Cost(v_i), \quad (4)$$

где α – неотрицательное рациональное число;

$Cost(e_{ji}) = (\left|x(e_{ji}) - x(t^l_m)\right| + \left|y(e_{ji}) - y(t^l_m)\right|) / \max_{e_{ji} \in \mathbf{E}} \left(Cost(e_{ji})\right)$.

При α = 0 формула (4) сводится к формуле (3) трассировки классическим алгоритмом Pathfinder аналогично варианту направленного поиска, представленному в работе [5]. Коэффициент α служит для управления степенью влияния компоненты направленного поиска на выбор вершин графа *G* при построении трассировочного дерева цепи. В табл. 3 представлены результаты применения различных способов расчета и фиксированных значений α на примере трассировки программируемой цифровой части ПАЦИС 5400ТР094 с элементами островной архитектуры для модифицированного алгоритма Pathfinder из [5] (без направленного поиска) в качестве базового.

Таблица 3

Результаты применения оценочной функции (4) модифицированного метода Pathfinder относительно результатов работы [5]

Table 3

The results of applying the estimation function (4) of the modified Pathfinder method relative to the results of [5]

№ п/п	Формула расчета или значение коэффициента α	Изменение времени трассировки, %	Изменение суммарного размера деревьев трассировки, %	Изменение средней задержки критического пути, %
1	$\alpha = \sqrt{iterN}$	–21,54 / –34,53	–0,04 / –0,25	–2,86 / –3,62
2	$\alpha = e^{Cost/maxCost}\sqrt{iterN}$	–28,79 / –36,47	+0,14 / –0,36	–3,30 / –4,42
3	$\alpha = e^{(e/iterN)}$	–34,64 / –41,33	+0,35 / +0,35	–0,36 / –0,31
4	$\alpha = e^{\left(e/\sqrt{iterN}\right)}$	–39,75 / –48,06	+0,33 / +0,29	–3,89 / –3,18
5	$\alpha = \frac{e^{Cost/maxCost}}{\sqrt{iterN}}$	+7,11 / +5,69	+0,27 / +0,42	+3,73 / –0,10
6	α = 1,0	–17,01 / –21,89	+0,22 / +0,13	+1,61 / –1,59
7	α = 2,0	–31,81 / –42,65	+0,26 / –0,05	+0,59 / –2,74
8	α = 3,0	–41,46 / –49,95	+0,10 / +0,02	–4,02 / –1,96
9	α = 4,0	–47,65 / –55,24	0,00 / –0,13	–2,95 / –3,10
10	α = 8,0	–41,03 / –53,05	–0,10 / –0,81	–7,45 / –6,08
11	α = 10,0	–48,69 / –63,34	–0,05 / –0,57	–3,70 / –5,31
12	α = 13,0	–50,63 / –63,83	+0,10 / –0,17	–5,17 / –3,65
13	α = 14,0 (доля разведенных схем 0,97)	–45,86 / –61,86	+0,23 / –0,20	–4,10 / –5,13
13	α = 15,0 (доля разведенных схем 0,97)	–46,10 / –60,10	–0,03 / –0,43	–10,12 / –7,02
14	α = 20,0 (доля разведенных схем 0,95)	–42,87 / –57,01	+0,02 / –0,39	–8,89 / –7,01
15	α = 25,0 (доля разведенных схем 0,95)	–40,76 / –56,31	0,00 / –0,10	–7,73 / –7,73
16	α = 50,0 (доля разведенных схем 0,88)	–37,14 / –52,23	+0,24 / +0,01	–11,47 / –11,47

Примечание: доля разведенных схем определялась как отношение числа полностью трассированных к общему числу схем в используемом тестовом наборе.

Согласно табл. 3, так же как и в выводах работы [5], наилучшая разводимость тестового набора схем достигается при постоянном значении коэффициента α, причем при $\alpha > 13$ доля разведенных тестовых схем падает. Зависимость коэффициента силы направленного поиска от номера текущей итерации (см. табл. 3, строки 1–5) оказывает отрицательный эффект на результаты и длительность процедуры трассировки по сравнению с фиксированным значением.

Вторая модификация метода Pathfinder состоит в учете предварительной оценки перегруженности коммутационных ресурсов непосредственно после завершения этапа размещения. Поскольку в этот момент становится известным точное расположение всех логических элементов пользовательской проектной схемы на кристалле ПЛИС, на основании известных координат источника и приемников цепи могут быть определены опорные точки $\left(x_{n_m}^{\min}, y_{n_m}^{\min}\right)$, $\left(x_{n_m}^{\max} y_{n_m}^{\max}\right)$ охватывающих прямоугольников $\mathbf{BB}(n_m)$. Это означает, что для всех ребер $e_j \in \mathbf{E}$ графа коммутационных ресурсов $G = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$, согласно (1), (2), может быть определена величина $\mu(e_j)$, используемая для построения карты оценочной перегруженности трассировочных ресурсов. Стандартная формула (3) в этом случае преобразуется:

$$\text{cost}(v_i) = \text{cost}_{hist}^{i} + c(v_i) + w(e_i)\mu(e_i)\alpha Cost\,. \qquad (5)$$

Применение формулы (5) позволяет уменьшить среднее время поиска трассировочного решения на 31 % при росте дерева трассировки в среднем на 4 % на примере блока ПЛИС ПАЦИС 5400ТР094. Результаты совместного применения вариантов направленного поиска с методами, приведенными в работах [5, 17, 19], представлены в табл. 4.

Таблица 4

Обобщенные результаты исследования влияния направленного поиска

Table 4

Summary results of the directed search influence investigation

Вариант реализации направленного поиска	Изменение времени трассировки, %	Изменение суммарного размера деревьев трассировки, %	Изменение средней задержки критического пути, %
Модифицированный метод Pathfinder [17], формула (4), α = 1	–16,2 / –19,74	–1,69 / –2,08	–3,97 / –5,99
Модифицированный метод Pathfinder [17], формула (4), α = 2	–32,86 / –40,74	–2,64 / –2,61	–10,52 / –10,11
Комбинация метода [19] и формулы (4), α = 1	–48,62 / –55,10	–8,56 / –13,73	+3,44 / –0,56
Комбинация метода [19] и формулы (4), α = 2	–58,74 / –65,7	–13,08 / –14,07	+2,31 / –2,19
Комбинация метода [5] и формулы (4), α = 1	–59,43 / –63,33	–14,30 / –14,55	+7,05 / –0,36
Комбинация метода [5] и формулы (4), α = 2	–65,63 / –71,51	–13,90 / –14,77	+4,95 / +0,004
Модифицированный метод Pathfinder [17], формула (5), α = 2	–38,63 / –40,31	–0,41 / –0,44	–9,26 / –11,09

Примечание: ячейки таблицы содержат пары вида среднее / медианное значения разницы результатов трассировки тестового набора IWLS’2005 с помощью предложенной модификации и оригинальных методов [5, 17, 19].

Использование информации о геометрических характеристиках кристалла ПЛИС для дополнения модели описания ее трассировочных ресурсов позволяет улучшить результаты этапа трассировки. Согласно проведенным вычислительным экспериментам, обеспечено среднее ускорение от 20 до 40 % с сокращением средней задержки критического пути набора тестовых схем от 6 до 11 % в зависимости от деталей реализации эвристического метода поиска кратчайшего пути.

Заключение. Применение предложенной модели расширенного смешанного графа коммутационных ресурсов для этапа трассировки межсоединений в маршруте топологического проектирования на основе ПЛИС показало следующее. Путем учета архитектурных и геометрических характеристик коммутационной сети базового кристалла ПЛИС модель формирует для нее адекватное и компактное описание. По расчетной оценке объем памяти компьютера, требуемый для хранения предложенной модели, лишь на 17,2 % превышает объем для классического ориентированного трассировочного графа. При этом представленная модель позволяет разработать и внедрить изменения в целевую функцию классического метода Pathfinder для ускорения решения задачи трассировки.

Предложенные две модификации позволили ускорить сходимость к трассировочному решению в среднем на 50,6 и 38,6 % соответственно при сохранении полной трассируемости тестовых наборов IWLS’2005, ISCAS’89 и LGSynth’89. Применение первой модификации привело к улучшению временных характеристик имплементаций проектных схем на 5,2 % в среднем, использование второй – позволило улучшить их на 9,3 % относительно результатов немодифицированного метода Pathfinder.

Литература

1. ***Wu Y.-L., Chang D.*** On the NP-completeness of regular 2-d FPGA routing architectures and a novel solution // IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design. San Jose, CA: IEEE, 1994. P. 362–366. https://doi.org/10.1109/ICCAD.1994.629819

2. ***Vercruyce D., Vansteenkiste E., Stroobandt D.*** CRoute: a fast high-quality timing-driven connection-based FPGA router // 2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). San Diego, CA: IEEE, 2019. P. 53–60. https://doi.org/10.1109/FCCM.2019.00017

3. ***Murray K. E., Zhong S., Betz V.*** AIR: A fast but lazy timing-driven FPGA router // 2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). Beijing: IEEE, 2020. P. 338–344. https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045175

4. VTR 8: High-performance CAD and customizable FPGA architecture modeling / ***K. E. Murray, O. Petelin, Sh. Zhong et al.*** // ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst. 2020. Vol. 13. Iss. 2. Art. No. 9. https://doi.org/10.1145/3388617

5. ***Заплетина М. А.*** Методы ускорения работы модифицированного алгоритма трассировки Pathfinder для ПЛИС островного типа // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 4. С. 27–33. https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-4-27-33

6. ***Zhou Y., Vercruyce D., Stroobandt D.*** Accelerating FPGA routing through algorithmic enhancements and connection-aware parallelization // ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst. 2020. Vol. 13. Iss. 4. Art. No. 18. https://doi.org/10.1145/3406959

7. ***He J., Burtscher M., Manohar R., Pingali K.*** SPRoute: A scalable parallel negotiation-based global router // 2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). Westminster, CO: IEEE, 2019. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/ICCAD45719.2019.8942105

8. ***Dijkstra E. W.*** A note on two problems in connexion with graphs // Numer. Math. 1959. Vol. 1. P. 269–271. https://doi.org/10.1007/BF01386390

9. ***Moore E. F.*** The shortest path through a maze // Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching. Part II. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1959. P. 285–292.

10. ***Lee C. Y.*** An algorithm for path connections and its applications // IRE Transactions on Electronic Computers. 1961. Vol. EC-10. No. 3. P. 364–365. https://doi.org/10.1109/TEC.1961.5219222

11. ***Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B.*** A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. Vol. 4. Iss. 2. P. 100–107. https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136

12. ***McMurchie L., Ebeling C.*** PathFinder: a negotiation-based performance-driven router for FPGAs // Proceedings of the 1995 ACM Third International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA'95). New York: ACM, 1995. P. 111–117. https://doi.org/10.1145/201310.201328

13. ***Yang S.*** Logic synthesis and optimization benchmarks: Technical report, MCNC, 1988 // Proceedings of 1989 MCNC International Workshop on Logic Synthesis. Raleigh, NC: MCNC, 1989. P. 14.

14. IWLS 2005 benchmarks / initiated by C. Albrecht // International Workshop on Logic & Synthesis [Электронный ресурс]. URL: https://iwls.org/iwls2005/benchmarks.html (дата обращения: 05.10.2022).

15. ***Оре О.*** Графы и их применение / пер. с англ. Л. И. Головиной; под ред. И. М. Яглома. М.: Мир, 1965. 174 с.

16. ***Spindler P., Johannes F. M.*** Fast and accurate routing demand estimation for efficient routability-driven placement // 2007 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Nice: IEEE, 2007. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/DATE.2007.364463

17. Маршрут топологического синтеза для реконфигурируемых систем на кристалле специального назначения / ***С. В. Гаврилов, Д. А. Железников, М. А. Заплетина и др.*** // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 3. С. 211–223. https://doi.org/10.1134/S0544126919030050

18. ***Corno F., Reorda M. S., Squillero G.*** RT-level ITC'99 benchmarks and first ATPG results // IEEE Design & Test of Computers. 2000. Vol. 17. Iss. 3. P. 44–53. https://doi.org/10.1109/54.867894

19. ***Zapletina M. A., Zheleznikov D. A., Gavrilov S. V.*** Improving pathfinder algorithm performance for FPGA routing // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2021). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2021. P. 2054–2057. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396608

Статья поступила в редакцию 28.07.2022 г.; одобрена после рецензирования 17.08.2022 г.; принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторе

Заплетина Мария Андреевна – научный сотрудник отдела систем автоматизированного проектирования интегральных схем Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), zapletina_m@ippm.ru

References

1. Wu Y.-L., Chang D. On the NP-completeness of regular 2-d FPGA routing architectures and a novel solution. *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design.* San Jose, CA, IEEE, 1994, pp. 362–366. https://doi.org/10.1109/ICCAD.1994.629819

2. Vercruyce D., Vansteenkiste E., Stroobandt D. CRoute: a fast high-quality timing-driven connection-based FPGA router. *2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM).* San Diego, CA, IEEE, 2019, pp. 53–60. https://doi.org/10.1109/FCCM.2019.00017

3. Murray K. E., Zhong S., Betz V. AIR: A fast but lazy timing-driven FPGA router. *2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC).* Beijing, IEEE, 2020, pp. 338–344. https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045175

4. Murray K. E., Petelin O., Zhong Sh., Wang J. M., Eldafrawy M., Legault J.-Ph., Sha E., Graham A. G., Wu J., Walker M. J. P., Zeng H., Patros P., Luu J., Kent K. B., Betz V. VTR 8: High-performance CAD and customizable FPGA architecture modeling. *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.,* 2020, vol. 13, iss. 2, art. no. 9. https://doi.org/10.1145/3388617

5. Zapletina M. A. Methods for speeding up the modified pathfinder routing algorithm for island-style FPGA. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES),* 2021, no. 4, pp. 27–33. (In Russian). https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-4-27-33

6. Zhou Y., Vercruyce D., Stroobandt D. Accelerating FPGA routing through algorithmic enhancements and connection-aware parallelization. *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.,* 2020, vol. 13, iss. 4, art. no. 18. https://doi.org/10.1145/3406959

7. He J., Burtscher M., Manohar R., Pingali K. SPRoute: A scalable parallel negotiation-based global router. *2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD).* Westminster, CO, IEEE, 2019, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/ICCAD45719.2019.8942105

8. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.,* 1959, vol. 1, pp. 269–271. https://doi.org/10.1007/BF01386390

9. Moore E. F. The shortest path through a maze. *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching,* part II. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1959, pp. 285–292.

10. Lee C. Y. An algorithm for path connections and its applications. *IRE Transactions on Electronic Computers,* 1961, vol. EC-10, no. 3, pp. 346–365. https://doi.org/10.1109/TEC.1961.5219222

11. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics,* 1968, vol. 4, iss. 2, pp. 100–107. https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136

12. McMurchie L., Ebeling C. PathFinder: a negotiation-based performance-driven router for FPGAs. *Proceedings of the 1995 ACM Third International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA'95).* New York, ACM, 1995, pp. 111–117. https://doi.org/10.1145/201310.201328

13. Yang S. Logic synthesis and optimization benchmarks: Technical report, MCNC, 1988. *Proceedings of 1989 MCNC International Workshop on Logic Synthesis.* Raleigh, NC, MCNC, 1989, p. 14.

14. Albrecht C. (init.) IWLS 2005 benchmarks. *International Workshop on Logic & Synthesis.* Available at: https://iwls.org/iwls2005/benchmarks.html (accessed: 05.10.2022).

15. Ore O. *Graphs and their uses.* New York, Random House, 1963. 131 p.

16. Spindler P., Johannes F. M. Fast and accurate routing demand estimation for efficient routability-driven placement. *2007 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition.* Nice, IEEE, 2007, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/DATE.2007.364463

17. Gavrilov S. V., Zheleznikov D. A., Zapletina M. A., Khvatov V. M., Chochaev R. Z., Enns V. I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. *Russ. Microelectron.,* 2019, vol. 48, iss. 3, pp. 176–186. https://doi.org/10.1134/S1063739719030053

18. Corno F., Reorda M. S., Squillero G. RT-level ITC'99 benchmarks and first ATPG results. *IEEE Design & Test of Computers,* 2000, vol. 17, iss. 3, pp. 44–53. https://doi.org/10.1109/54.867894

19. Zapletina M. A., Zheleznikov D. A., Gavrilov S. V. Improving pathfinder algorithm performance for FPGA routing. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2021).* St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2021, pp. 2054–2057. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396608

The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 17.08.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the author

Mariya A. Zapletina – Scientific Researcher of the Computer-Aided Design of IC Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), zapletina_m@ippm.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК [004.421:004.932.72'1]:632
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-787-794

Алгоритм обнаружения и распознавания болезней растений с использованием каскадных классификаторов

Л. Г. Гагарина, А. В. Чирков

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

andrewchirckov@gmail.com

Аннотация. Безопасность сельскохозяйственных культур в большинстве случаев можно обеспечить, анализируя изображения листьев на предмет наличия отклонений. Проблема раннего обнаружения болезней растений является актуальной и своевременной, для решения которой необходима разработка алгоритма обнаружения и распознавания болезней растений на основе метода каскадных классификаторов. В работе предложен алгоритм для обнаружения и распознавания болезней растений посредством использования интегрального представления кадра, каскадов Хаара, перевода изображения в черно-белое с дальнейшим обучением классификаторов на обучающих выборках и отбором результирующего каскада, позволяющим регулировать точность и энергопотребление в зависимости от задачи. Особенность данного алгоритма заключается в применении окон при сканировании изображения, масштабируемости детектора и последующем многократном запуске для изображения с использованием разного размера. При использовании предлагаемого алгоритма точность распознавания болезней растений составила 80,9 %.

Ключевые слова: болезни растений, каскадные классификаторы, распознавание изображения, искусственные нейронные сети, глубокое обучение

Для цитирования: Гагарина Л. Г., Чирков А. В. Алгоритм обнаружения и распознавания болезней растений с использованием каскадных классификаторов // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 787–794. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-787-794

© Л. Г. Гагарина, А. В. Чирков, 2022

Original article

Algorithm for plant disease detection and recognition using cascade classifiers

L. G. Gagarina, A. V. Chirkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

andrewchirckov@gmail.com

Abstract. The safety of crops in most cases can be provided by analyzing the image of the leaves for any anomalies. The problem of plant diseases' early detection is a major issue nowadays, its solution requires the development of an algorithm for detecting and recognizing plant diseases based on cascade classification method. In this work, an algorithm for detecting and recognizing plant diseases is proposed allowing the adjustment of accuracy and power consumption depending on the task by using the integral representation of frames, Haar cascades, converting the image to black and white with the calculated definition of classifiers on training samples and selecting the resulting counter. The uniqueness of the proposed algorithm consists in the use of windows at image scanning, the detector scalability and the subsequent multiple launching for image using different sizes. It has been established that the recognition rate in using the proposed algorithm is 80.9 %.

Keywords: plant diseases, cascade classifiers, image recognition, artificial neural networks, deep learning

For citation: Gagarina L. G., Chirkov A. V. Algorithm for plant disease detection and recognition using cascade classifiers. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 787–794. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-787-794

Введение. Вследствие появления очагов болезней растений создается угроза безопасности человека, его жизни, здоровью [1]. В зависимости от погодных условий и фитосанитарного состояния растений распространение болезней достигает 70–80 % от всей популяции. Распространенный и надежный метод обнаружения и распознавания болезней растений – анализ поверхности листьев, стеблей, коры деревьев, а также гистологических срезов с помощью микроскопа. При наличии большого массива растений для анализа изображений с расстояния используют гиперспектральные камеры со следующими характеристиками: спектр широкого диапазона действия, количество каналов от 3 до 6, высокое качество оптической системы (дифракционное), общая зеркальная основа объектива. Кроме того, существуют методы, использующие алгоритмические языки [2] и обнаружение объектов в видеоряде: гибкое сравнение на графах, поиск объектов по цвету, применение нейронных сетей.

Анализ существующих решений. Для решения задачи распознавания болезней растений на больших расстояниях, как правило, используется метод матриц смежности GLCM – статистический анализ текстур изображения [3]. Суть анализа заключается в поиске частоты появления заданных пар пикселей, которые находятся на определенном расстоянии друг от друга. Однако значительное перекрытие функций распределения

создает трудности при определении пороговых значенийи однозначной идентификации вида заболевания.

Обработка изображений чаще всего осуществляется классическими методами машинного обучения с применением продвинутых нейронных сетей. Для определения наиболее подходящего метода (или связки методов) для обработки изображений необходимо проанализировать существующие решения с учетом специфики предметной области (таблица).

Сравнение методов обработки изображений листьев растений
Comparison of methods for processing images of plant leaves

Метод	Описание	Преимущества	Недостатки
KNN (метод ближайших *k*-соседей)	Находит ближайший наиболее встречающийся объект относительно исходного запроса	Легкая реализация и качественный уровень распознавания	Медленно обучается, неустойчив к зашумленным данным при большом размере выборки
SVM (метод опорных векторов)	Находит гиперплоскость в *n*-размерном пространстве, которая однозначно разделяет объекты на классы	Точность прогноза высока. Надежно работает, когда пример обучения содержит ошибки	Плохо работает, когда выборка данных содержит много шума или большое количество данных, набор признаков на объект превышает общее количество объектов
PNN (вероятностная нейронная сеть)	Работает с четырехслойной структурой, которая включает в себя расчет расстояния, хранение переменной предиктора и сравнение голосов	Быстрота и точность прогноза	Требует много места для хранения данных
ANN (искусственная нейронная сеть)	Базовая форма представлена в виде многослойного персептрона, который обновляет вес посредством базового распространения	Хороший потенциал для обнаружения болезней листьев растений	Требует много времени на обучение
Нечеткая логика	Подход, позволяющий переменным иметь несколько верных значений, описанных с помощью функции	Высокая скорость, малое потребление оперативной памяти	Низкая точность
GLCM (матрица совместной встречаемости уровней серого цвета)	Статистический метод исследования текстур: частота распространения пар пикселей с определенными значениями и определенным расстоянием между собой	Очень высокая точность по сравнению с остальными методами, высокая скорость; простота реализуемости и моделирования	Медленно обучается

Для обозначенных целей целесообразно использовать метод каскадных классификаторов, который содержит уровни в виде бинарного классификатора. Если после прохождения уровня прецедент определятся как отрицательный, то процесс прекращается. Каждая стадия использует небольшое количество признаков. Признаки вычисляются по мере необходимости. Возможно расширить каскад простых функций с помощью признаков Хаара, что повысит эффективность классификации. Объединение классификаторов в каскад позволяет увеличить точность детектирования болезни, а также убрать ненужное количество операций поиска. Таким образом, каскадный классификатор обеспечивает стабильно высокую производительность и используется в системах распознавания в режиме реального времени, что является важным фактором при любом мониторинге. Однако возможны большие расхождения в результатах работы и скорости.

Применение всех существующих методов требует аппаратных средств, в частности видеокамер, для осуществления мониторинга состояния наблюдаемой области и получения изображения растений. Выбор оборудования наблюдения за растениями зависит от расстояния до них, разрешение и качество изображений в кадре зависят от угла обзора и фокуса. Существуют системы видеонаблюдения, использующие принципы нелинейной динамики [4]. Кроме того, известны аналоговые и цифровые IP-видеокамеры. Аналоговая камера захватывает изображение и записывает его на видеорекордер и посылает сигнал через коаксиловый кабель в DVR [5]. В цифровой IP-камере кодер осуществляет преобразование сигнала фотоматрицы в цифровой поток. С помощью IP-камер осуществляется мониторинг состояния растений в реальном времени. Если объект расположен на расстоянии порядка 50 м от объектива, то угол обзора камеры не должен превышать 40°. Для охвата всего помещения, например теплицы, необходимы видеокамеры с углом обзора объектива свыше 80°. Однако чем дальше объект от объектива, тем хуже детализация изображения.

Для решения данной проблемы можно реализовать рельсовые установки для передвижения камеры по помещению или использовать большее количество видеокамер. Разрешение IP-камер имеет широкий спектр – от VGA до 10 Мпк и более. Выбор формата и разрешения зависит от конкретной задачи. У камер с высоким разрешением слабая чувствительность, малый объем оперативной памяти и высокая цена. Для мониторинга внутри закрытых помещений, когда сигнал передается только на специальный приемник, а не в общую сеть, используются камеры CCTV. В таких камерах применяют CCD- или CMOS-матрицы [6]. CCD-матрицы чувствительнее, но цена выше. При соблюдении оптимального соотношения всех характеристик внутри помещений предлагается использовать IP-камеры с CCD-матрицей с разрешением 4:3.

Программными средствами распознавания объектов в видеоряде являются библиотеки компьютерного зрения для обработки изображений и машинного обучения, которые позволяют обнаружить объект в видеоряде. Перечислим основные программные средства [7] для существующих алгоритмов распознавания изображения: TensorFlow – библиотека, которая находится в хранилище github, имеет открытый доступ к исходному коду и предоставляет возможность реализации нейронной сети в виде графовой модели; OpenCV – библиотека, которая находится в хранилище github и имеет открытый доступ к исходному коду, применяется в сфере компьютерного зрения, предоставляет возможность обрабатывать изображения с использованием численных алгоритмов общего назначения.

Программная реализация метода каскадных классификаторов. Рассмотрим алгоритм обнаружения и распознавания болезней растений на основе метода каскадных классификаторов и дальнейшей его программной реализации [8]. Главная особенность метода состоит в сканировании изображения объекта с помощью сканирующего окна. В качестве объекта выступают листья и паттерны болезней (рисунок). Обычно до запуска детектора определенного размера происходит изменение масштабов изображения.

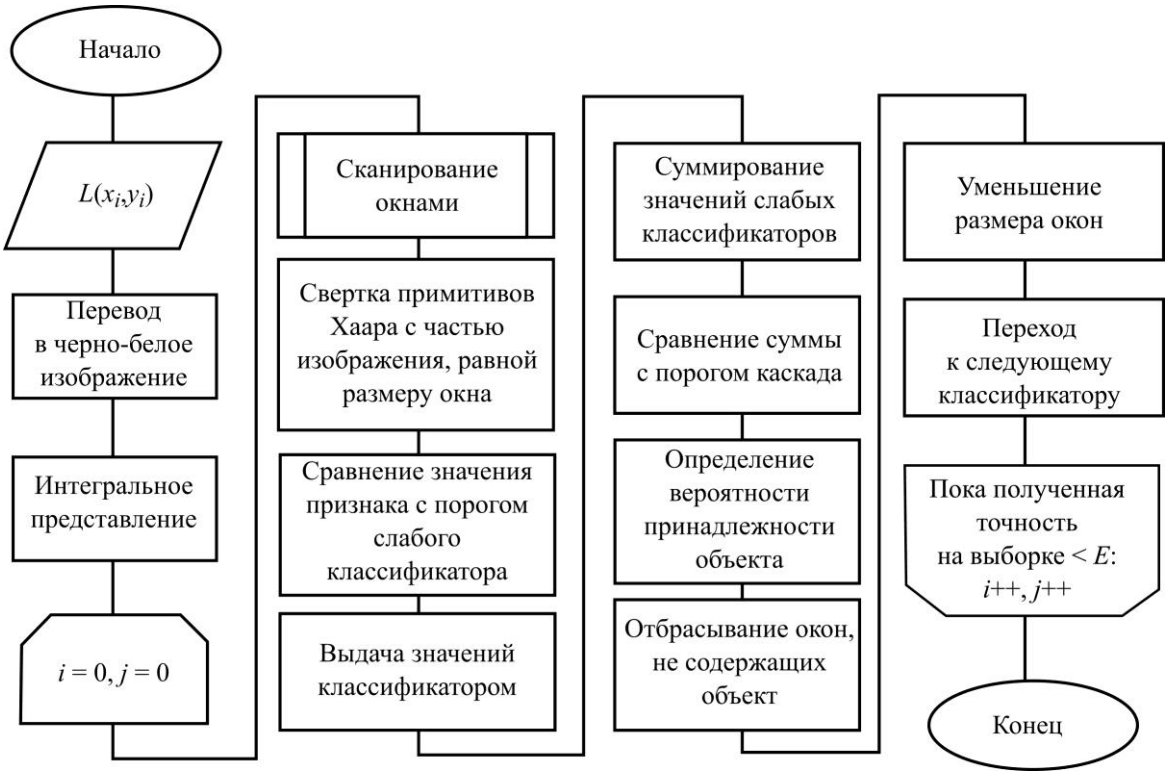


Схема алгоритма обнаружения и распознавания изображения
Scheme of an algorithm for image detection and recognition

Приведем последовательность обучения каскадного классификатора:

Шаг 1. Определение ложного распознавания каскада *F*.

Шаг 2. Определение верного распознавания каскада *d*.

Шаг 3. Определение ложного распознавания слоя каскада *fF*.

Шаг 4. Определение контрольной выборки данных для валидации.

Шаг 5. Обучение нового слоя каскада с соблюдением условий: $d_i > d$ и $d_i f$.

Шаг 6. Оценка только что обученного слоя каскада: если доля ложных распознаваний меньше целевого показателя *F*, то обучение заканчивается. Иначе – переход на шаг 4 для обучения нового уровня каскада.

Если обучено *K* уровней каскада, то средняя сложность *N* определения доли верного распознавания каскада вычисляется так:

$$N = n_i + \sum_{i=2}^{K}(n_i \prod_{j=2}^{i} p_j), \quad D = \prod_{i=1}^{K} d_i ,$$

где n_i – сложность *i*-го уровня каскада; p_j – вероятность вычисления *j*-го уровня каскада; d_i – доля верных распознаваний *i*-го уровня каскада.

Работа каскадного классификатора начинается с задания входных данных $L(x_i, y_j)$. Эти данные представляют собой матрицу, которая отражает характеристики изображения. Здесь L – интенсивность пикселя, или глубина, i – координата по оси x, j – координата по оси y. Далее изображение переводится в черно-белый формат, т. е. содержит один канал для цвета, и при составлении формулы учитывается только интенсивность одного канала:

$$L(x_i, y_j) = L(x_i, y_j) - L(x_i - 1, y_j - 1) + L(x_i, y_j - 1) + L(x_i - 1, y_j).$$

Оригинальное изображение представляется в виде интегрального путем сравнения интенсивности отдельно взятого пикселя с суммой всех пикселей выше и левее этого пикселя. В результате вычисляется сумма пикселей внутри прямоугольника и изображение анализируется.

Для математического описания объектов (паттернов болезней), которые нужно детектировать, используется отображение в виде признаков. Отображение – это f: $X \to D_f$, где X – множество признакового пространства; f_1, ..., f_n – набор признаков, описывающих объект; $x \in X$ – это объект, который описывается признаками, он является вектором, содержащим в себе все признаки; D_f – множество допустимых значений признака.

Геометрическая интерпретация вычисления признаков представляет собой вычитание белого прямоугольника из черного. Далее следует построение классификатора с применением комбинации простых классификаторов – объединение в каскад. Каскад определяет вероятность нахождения объекта в текущем окне. Если окно пустое, то оно немедленно отбрасывается. При наличии объекта внутри окна это окно передается на следующий каскад. Чем больше каскадов пройдет окно, тем выше вероятность, что оно содержит объект. В результате останется только одно окно.

Тестирующая выборка состоит из 500 изображений. Анализировали листья пшеницы с десятью видами болезней пшеницы. Выборка стандартно разделена в отношении 4:1. Так как снимки с беспилотных устройств имеют достаточно высокий уровень шума, то необходимо провести предобработку изображений. Для этого использовали бинаризацию изображения методом Отса. Для сравнения с аналогами необходимо найти оптимальное количество признаков и минимальный порог точности определения заболеваний растений. Возможно вычисление от 10 000 до 170 000 значений признаков. Чем выше количество используемых признаков, тем выше точность, но ниже скорость и энергоэффективность. Учитывая специфику предметной области, необходимо определить заболевания растений с точностью выше 65 %. В результате тестирования алгоритма и подбора параметров оптимальным количеством является использование около 150 000 значений признаков. Для сравнения взяты следующие алгоритмы: классический принцип потенциалов [9]; алгоритм Эль-Гаммаля [10]; предлагаемое решение – метод каскадных классификаторов. При использовании классического алгоритма, основанного на принципе потенциалов, правильно распознаны болезни в 65,9 % случаев, алгоритм Эль-Гаммаля правильно распознал 76,8 % случаев, точность распознавания предлагаемого алгоритма составила 80,9 %.

Заключение. Особенность алгоритма обнаружения и распознавания болезней растений на основе метода каскадных классификаторов заключается в использовании окон при сканировании изображения, масштабируемости детектора и последующем многократном запуске для изображения с применением разного размера. При стандартном

подходе, напротив, сначала масштабируется изображение, а затем запускается детектор фиксированного размера. Так как точность работы алгоритма и энергопотребление зависят от количества признаков, то, регулируя количество используемых признаков, можно подобрать оптимальное соотношение точности распознавания болезней растений, а также временные затраты и энергопотребление.

Предполагается программная реализация метода каскадного классификатора в инструментальной среде PyCharm на высокоуровневых языках программирования Python или C++ в инструментальной среде Visual Studio. Перспектива интеграции данного алгоритма в систему безопасности сельскохозяйственного предприятия позволит сохранить урожай и обезопасить потребителей.

Литература

1. ***Бахтеев Д. В.*** О сущности и перспективах использования искусственных нейронных сетей в раскрытии и расследовании преступлений // Вопросы российской юстиции. 2016. № 3. С. 4–6.

2. ***Гагарина Л. Г., Кокорева Е. В.*** Введение в теорию алгоритмических языков и компиляторов. М.: Форум, 2009. 176 с.

3. ***Тутыгин В. С., Аль-Винди Басим Х. М. А.*** Способ распознавания болезней растений по текстурным признакам с использованием нечеткой логики // Инженерный вестник Дона: электрон. журн. 2019. № 3 (54). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5846 (дата обращения: 20.06.2022).

4. ***Гагарина Л. Г.*** Современные проблемы информатики и вычислительной техники: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2017. 204 с.

5. ***Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Чирков А. В., Миронов Н. С.*** Особенности организации доступа в автоматизированных информационных системах на основе принципов нелинейной динамики // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 4. С. 50–56. https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.17.4.007

6. ***Лавелина Е. С., Закуанова М. Р., Масловская М. А.*** Отслеживание объектов в видеопотоке // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: эл. сб. ст. по материалам LIV Междунар. студ. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс]. 2017. № 6 (53). С. 132–142. URL: https://sibac.info/archive/technic/6(53).pdf (дата обращения: 20.06.2022).

7. ***Дятлов Е. И.*** Машинное зрение (аналитический обзор) // Математические машины и системы. 2013. № 2. С. 32–40.

8. ***Chaki J., Parekh R.*** Designing an automated system for plant leaf recognition // IJAET. 2012. Vol. 2. Iss. 1. P. 149–158.

9. ***Журавлев Ю. И., Рязанов В. В., Сенько О. В.*** «Распознавание». Математические методы. Программная система. Практические применения. М.: ФАЗИС, 2006. 176 с.

10. ***El-Helly M., Rafea A., El-Gammal S.*** An integrated image processing system for leaf disease detection and diagnosis // Proceedings of the 1st Indian International Conference on Artificial Intelligence (Hyderabad, India, Dec. 18–20, 2003). Hyderabad: IICAI, 2003. P. 1182–1195.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 24.07.2022 г.;
принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gagar@bk.ru

Чирков Андрей Владимирович – аспирант, специалист по учебно-методической работе Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), andrewchirckov@gmail.com

References

1. Bakhteev D. V. On the essence and prospects of using artificial neural networks in the detection and investigation of crimes. *Voprosy rossiyskoy yustitsii,* 2016, no. 3, pp. 4–6. (In Russian).

2. Gagarina L. G., Kokoreva E. V. *Introduction to the theory of algorithmic languages and compilers.* Moscow, Forum Publ., 2009. 176 p. (In Russian).

3. Tutygin V. S., Al-Windi Basim K. M. A. Method of recognition of plant diseases by textural signs using fuzzy logic. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Journal of Don,* 2019, no. 3 (54). (In Russian). Available at: http://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/N3y2019/5846 (accessed: 20.06.2022).

4. Gagarina L. G. *Modern problems of informatics and computer technology,* study guide. Moscow, MIET, 2017. 204 p. (In Russian).

5. Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Chirkov A. V., Mironov N. S. Features of organization of access in automated information systems based on the principles of nonlinear dynamics. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University,* 2021, vol. 17, no. 4, pp. 50–56. (In Russian). https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.17.4.007

6. Lavelina E. S., Zakuanova M. R., Maslovskaya M. A. Tracking objects in a video stream. *Nauchnoye soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskiye nauki = Scientific Community of Students of the 21st century. Technical Sciences, proceedings of LIV intern. stud. research-to-pract. conf.* 2017, no. 6 (53), pp. 132–142. (In Russian). Available at: https://sibac.info/archive/technic/6(53).pdf (accessed: 20.06.2022).

7. Dyatlov E. I. Machine vision (analytical review). *Matematychnì mashyny ì systemy,* 2013, no. 2, pp. 32–40. (In Russian).

8. Chaki J., Parekh R. Designing an automated system for plant leaf recognition. *IJAET,* 2012, vol. 2, iss. 1, pp. 149–158.

9. Zhuravlev Yu. I., Ryazanov V. V., Sen'ko O. V. *"Raspoznavaniye". Mathematical methods. Software system. Practical applications.* Moscow, FAZIS Publ., 2006. 176 p. (In Russian).

10. El-Helly M., Rafea A., El-Gammal S. An integrated image processing system for leaf disease detection and diagnosis. *Proceedings of the 1st Indian International Conference on Artificial Intelligence (Hyderabad, India, Dec. 18–20, 2003).* Hyderabad, IICAI, 2003, pp. 1182–1195.

The article was submitted 18.04.2022; approved after reviewing 24.07.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

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

Andrey V. Chirkov – PhD student, Specialist in Educational and Methodical Work of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), andrewchirckov@gmail.com

Научная статья
УДК [681.5: 004.85]:631.12
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-795-806

Разработка алгоритма функционирования и особенности обучения когнитивного модуля искусственного интеллекта роботизированной системы тепличного растениеводства

***А. А. Кирьянов*[1], *С. Б. Беневоленский*[2], *В. Ю. Сироткин*[1]**

[1]*ООО «ЭРЛАБ», г. Москва, Россия*
[2]*Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы, г. Москва, Россия*

5079311@mail.ru

Аннотация. Мобильная часть когнитивного модуля и его программное обеспечение предназначены для обработки потока фото- и видеоданных. При этом создаются датасеты, используемые в системах искусственного интеллекта на базе сегментарных моделей нейронных сетей глубокого обучения. В работе приведены результаты разработки алгоритмов машинного обучения и функционирования нейросети мобильной части когнитивного модуля роботизированной системы тепличного растениеводства и программного обеспечения для реализации разработанных алгоритмов. Представленная разработка основана на методе распараллеливания потоков видеозахвата. Тренировка нейронных сетей для определения применимости методов распознавания осуществлена средствами DIGITS с использованием фреймворка Caffe. Координатная привязка реализована на основе команды оператора о захвате сенсорами фиксируемого объекта с автоматическим определением его положения по координатам, получаемым от энкодера. Результаты сохраняются в файловой системе каталогов изображений с указанием координат пространственной привязки объектов фиксации в имени файлов.

Ключевые слова: роботизированный комплекс растениеводства, искусственный интеллект, нейронная сеть, программное обеспечение

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках федерального проекта «Искусственный интеллект» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Для цитирования: Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б., Сироткин В. Ю. Разработка алгоритма функционирования и особенности обучения когнитивного модуля искусственного интеллекта роботизированной системы тепличного растениеводства // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 795–806. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-795-806

© А. А. Кирьянов, С. Б. Беневоленский, В. Ю. Сироткин, 2022

Original article

Operation algorithm development and learning features of the cognitive module of artificial intelligence of a robotic system for greenhouse crop production

A. A. Kir'yanov[1], S. B. Benevolenskiy[2], V. Yu. Sirotkin[1]

[1] "ERLAB" LLC, Moscow, Russia
[2] Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services, Moscow, Russia

5079311@mail.ru

Abstract. The mobile part of the cognitive module and its software are intended for photo and video stream processing. Within these jobs the datasets used in artificial intelligence sources based on segmental models of deep learning neural networks are created. This work presents the results of the development of algorithms of machine learning and neural network functioning of the mobile part of the cognitive module of the robotic system for greenhouse crop production and the software for the developed algorithms implementation. The proposed development is based on a method of video capture streams parallelizing. Neural networks training for recognition methods applicability determination has been done by utilizing DIGITS search engine using the Caffe framework. Coordinate referencing is implemented based on the operator's command to capture the object being fixed by sensors with automatic determination of its position according to the coordinates received from the encoder. The results are stored in the imagery catalogues' file system with mentioning of space referencing coordinates of object to capture in the file names.

Keywords: robotic plant growing complex, artificial intelligence, neural network, software

Funding: the work has been supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises under the scope of federal project "Artificial Intelligence" of the national program "Digital Economy of the Russian Federation".

For citation: Kir'yanov A. A., Benevolenskiy S. B., Sirotkin V. Yu. Operation algorithm development and learning features of the cognitive module of artificial intelligence of a robotic system for greenhouse crop production. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 795–806. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2022-27-6-795-806

Введение. Разработка и внедрение систем искусственного интеллекта [1–3], в частности в сферу сельского хозяйства, в настоящее время интенсивно ведутся во всех развитых странах [5–8]. Искусственный интеллект, связанный с созданием систем машинного зрения, активно используется в работах по автоматизации сельскохозяйственной техники [9–12]. Согласно прогнозу, к 2024 г. разработки в сфере искусственного интеллекта будут способствовать росту мировой экономики [4]. В роботизированном комплексе для обработки сельскохозяйственных культур с использованием искусственного интеллекта на базе нейросетевых технологий [13–16] одним из важнейших компонентов является мобильная часть когнитивного модуля. Мобильная часть когнитивного

модуля должна обеспечить получение фото- и видеоданных, их картографирование, каталогизирование и передачу на серверную часть, оборудованную достаточными вычислительными мощностями для выполнения тренировки нейронной сети.

Цель настоящей статьи – разработка алгоритмов и программного обеспечения для обучения и функционирования мобильной части когнитивного модуля роботизированной системы тепличного растениеводства.

Алгоритмы функционирования и особенности обучения модуля искусственного интеллекта. В основе работы создаваемой системы лежит нейросетевая парадигма, которая позволяет получить заданные функциональные возможности на основе предварительного обучения. При этом для обеспечения быстродействия при получении данных, а также для целостности данных использована потоковая схема передачи и буферизация входной информации на бортовой носитель мобильной части комплекса (рис. 1). В процессе создания датасета участвует программный модуль формирования, алгоритм работы которого показан на рис. 2.

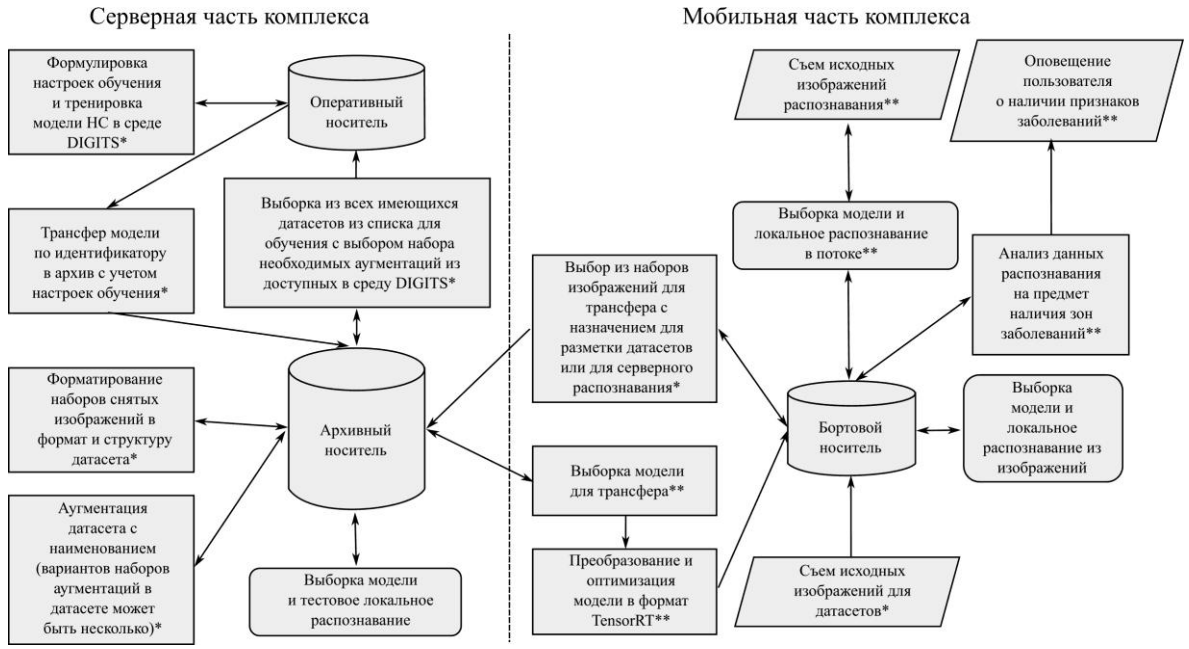


Рис. 1. Потоковая схема когнитивного модуля (* – этапы процесса обучения;
** – этапы процесса мобильного распознавания)
Fig. 1. Cognitive module flow chart (* – stages of the learning process;
** – stages of the mobile recognition process)

Полный цикл обучения нейронной сети включает в себя такие процедуры, как (см. рис. 1):

1) получение исходных данных, в процессе чего потоки от видеосенсоров направляются в программный модуль формирования, где из потока формируются отдельные помеченные координатами изображения и сохраняются на внутренний накопитель;

2) выбор из наборов изображений для трансфера с назначением для разметки датасетов или для серверного распознавания. При этом каталогизированные данные с бортового носителя информации мобильной части когнитивного модуля выбираются в соответствии с параметрами, заданными оператором, и переносятся в архивное хранилище серверной части когнитивного модуля;

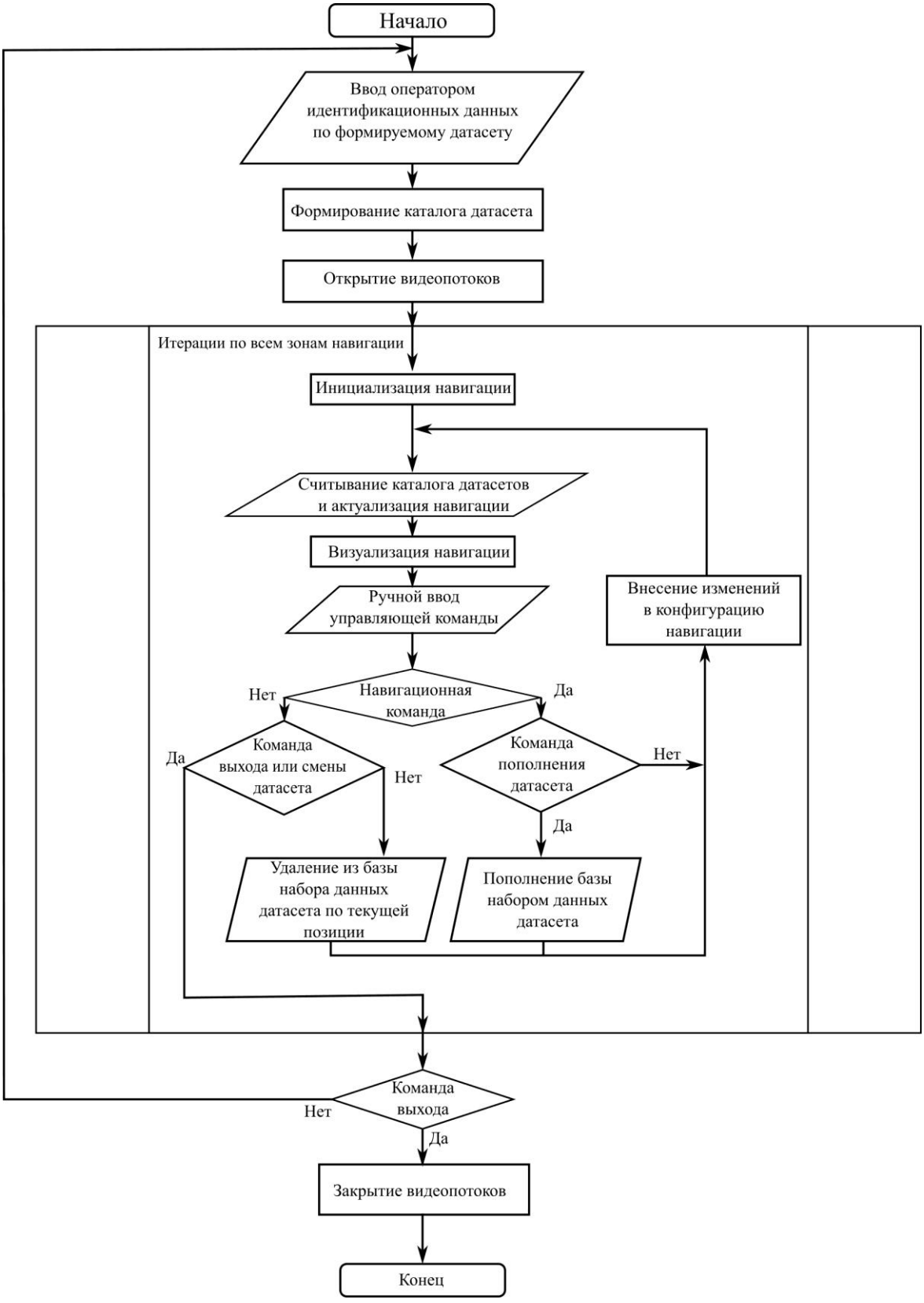


Рис. 2. Алгоритм съема исходных фото- и видеоданных для датасета
Fig. 2. Algorithm for capturing the initial photo- and video data for the dataset

3) форматирование наборов снятых изображений в формат и структуру датасета с помощью модуля формирования датасета для обучения (данные из серверного хранилища когнитивного модуля форматируются в структуру датасета и размещаются в рабочую зону программы аугментации);

4) аугментация датасета с наименованием (вариантов наборов аугментаций в датасете может быть несколько), включая преобразование и масштабирование данных для их использования при обучении и валидации в программной среде DIGITS;

5) выборка из всех имеющихся датасетов из списка для обучения с выбором набора необходимых аугментаций из доступных в среду DIGITS;

6) формулировка настроек обучения и тренировка модели нейронной сети в среде DIGITS;

7) трансфер обученной модели по идентификатору в архив с учетом настроек обучения.

Предложенная потоковая схема отражает процесс бортового распознавания мобильной частью когнитивного модуля. Перечислим программные элементы, участвующие в этом процессе:

– выборка модели для трансфера, при которой обученная нейронная сеть выбирается из реестра по принадлежности к культуре и загружается в виде файла;

– преобразование и оптимизация модели в формат TensorRT, в частности при запуске распознавания один раз обученная модель формата .caffe для ускорения и оптимизации тензорных вычислений преобразуется с помощью утилиты SegNet к формату TensorRT;

– выборка модели и локальное распознавание в потоке, при этом на стороне мобильной части когнитивного модуля в режиме распознавания открываются фото- и видеопотоки от сенсоров, которые направляются в утилиту распознавания SegNet в режиме входящего потока по протоколу RTSP;

– получение исходных изображений распознавания, заключающееся в том, что распознанные данные в виде координатных полигонов сохраняются в файл базы данных на бортовой накопитель;

– распознавание наличия зон заболеваний, при котором отдельно анализируются результирующие полигоны и удаляются полигоны ниже порога идентификации и полигоны нецелевых идентифицированных объектов;

– оповещение пользователя о наличии признаков заболеваний с их наложением на исходное изображение в виде цветовой маски и с указанием координат конкретного места идентификации на карте агронома.

Разработанный алгоритм получения исходных фото- и видеоданных для датасета (см. рис. 2) обеспечивает получение фото- и видеоданных, а также пометку в соответствии с данными от энкодера. При этом на начальном этапе необходим ввод оператором ряда параметров при формировании датасетов, а именно:

– выборка из списка ранее исследуемых территорий либо ввод новой территории;

– выборка из списка ранее идентифицированных культур либо ввод наименования новой культуры (сорта или штамма культуры);

– подтверждение текущей даты среза данных культуры либо выборка из существующего набора в случае, если процесс был начат, но не завершен ранее;

– ввод параметров территории (количество гряд и их длина) либо подтверждение корректности введенных ранее параметров для этой территории.

Введенные первые три параметра формируют пути датасета, а последние – счетчики картографирования. Далее проводится формирование структуры датасета исходя из

введенных данных и открываются многопоточные видеопотоки, дескрипторы которых будут использоваться в качестве источников для захвата фото- и видеоданных. Следующий этап – цикл захвата фото- и видеоданных и формирование контента датасета. В начале каждой итерации происходит уточнение позиции для картографирования текущих фото- и видеоданных, но при первой итерации счетчики выставляются в инициализированные положения.

Поскольку на этапе первичной итерации и на последующих этапах, а также в случае пополнения ранее заполняемого датасета структура датасета уже сформирована, для дальнейшей визуализации выполняется актуализация существующих в наборе датасета данных. В терминал выводится визуальная карта текущего наполнения датасета, и оператор вводит одну из инструкций:

– выполнение выхода из цикла, что повлечет за собой закрытие потоков и окончание;

– завершение сбора текущего датасета и переход к инструктажу по следующему датасету;

– удаление текущей позиции из датасета;

– пополнение или обновление текущей позиции в датасете;

– команда изменения текущих позиционных параметров.

В случае, если команда не связана с переходом к другому датасету или с завершением алгоритма, выполняется позиционная актуализация параметров и управление передается в точку актуализации карты визуализации. По окончании работы алгоритма формируется набор данных, пригодный для дальнейшей маркировки датасета.

Программная реализация разработанного алгоритма и практическое обучение модуля искусственного интеллекта. На основе описанного алгоритма создана программа, представляющая собой скрипт, написанный на языке Python. Программа использует компоненты библиотеки OpenCV 4.5.5, скомпилированной с поддержкой аппаратной библиотеки CUDA. В текущей редакции реализованы мультипотоки фото- и видеозахвата, визуализируемые в виде перемещаемых отдельных окон в количестве 9 единиц, 8 из которых обзорные и одно для макроскопического захвата. Программа открытия и конфигурации фото- и видеопотоков представлена в листинге 1 (в массиве cams содержатся инициализационные данные потоков, videos – число фото- и видеосенсоров, подключенных в текущий момент к операционной системе):

```
cap=[] # массив потоков
output=[] # массив идентификаторов окон визуализации
#инициализация видеопотоков
for vid in range (videos): # перебор открытых видеопотоков
    print (vid, end =" ") # вывод номера потока
    cap.append(cv2.VideoCapture(cams[vid]["video"])) # инициализация и открытие окон
                                                     # визуализации по видеопотоку
print ("Open all video captures complete") # сообщение об успехе открытия всех потоков
#применение инициализационных параметров бортового видеооборудования
for vid in range (videos): # перебор открытых видеопотоков
    print (vid, end =" ") # вывод номера потока
    cap[vid].set(cv2.CAP_PROP_FPS, fr_r) # Частота кадров
    cap[vid].set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, w_s) # Ширина кадров в видеопотоке
    cap[vid].set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, h_s) # Высота кадров в видеопотоке
    ret, img = cap[vid].read() # попытка чтения кадра из видеопотока
    output.append(img) # первичная визуализация кадра для инициализации размеров окна
print ("Config all video captures complete") # сообщение об успехе конфигурирования
                                             # всех потоков
```

Функция захвата фото- и видеоданных и формирования датасета представлена в листинге 2:

```
for vid in range (videos): # перебор всех открытых видеопотоков
    ret, img = cap[vid].read() # считывание кадра для визуализации
    width = int(img.shape[1] / scale) # масштабирование изображения в соответствии
                                      # с установками
    height = int(img.shape[0] / scale)
    if vid<8: # 8 видеопоток – от макроскопа
        output[vid] = rotate_image_90(cv2.resize(img, (width, height)), cams[vid]["rotate"])
        # функция поворота изображения
        cv2.imshow(f"camera{vid}", output[vid]) # визуализация кадра в соответствующем
                                                # видеопотоку окне
    else:
        output[vid] = rotate_image_90(cv2.resize(img, (640,480)), cams[vid]["rotate"])
        # функция поворота изображения
        cv2.imshow(f"camera{vid}", output[vid]) # визуализация кадра в соответствующем
                                                # видеопотоку окне
```

Запуск и управление осуществляются в терминале, запуск выполняется в операционной системе Ubuntu 18. Визуализация карты посевов выполнена в псевдотерминальном виде, формирование датасета доступно на носитель ровера, на котором запущена программа, либо на сетевой диск в операционной системе. Средствами функций CUDA осуществляется первичная фильтрация алгоритмами увеличения резкости краев.

Окно программы (рис. 3) демонстрирует поле позиционирования с индикацией координаты в текущем датасете в локации room: 1. Схематично в столбцах указаны горизонтальные координаты, а вертикальная позиция определяет координаты объектов в

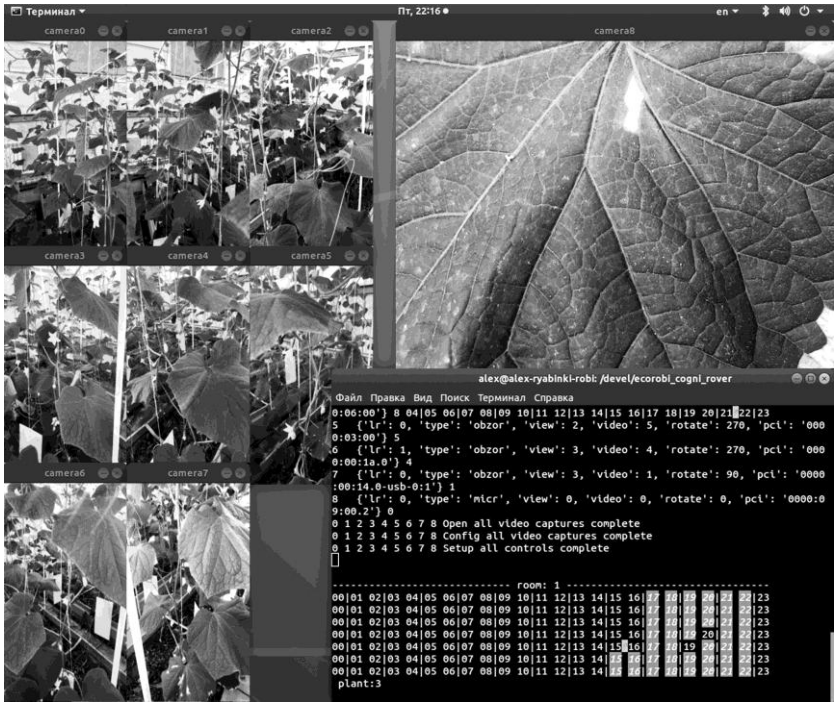


Рис. 3. Окно запущенной программы съема исходных фото- и видеоданных для датасета

Fig. 3. Window of the launched program for capturing initial photo- and video data for the dataset

столбцах. Выделены позиции объектов, по которым успешно выполнен захват набора изображений для датасета. В нижней строке указан статус последней вертикальной координаты – в данном примере plant:3, т. е. перемещение к объекту номер 3 в текущих 15 и 16 грядах. Возможно пополнение датасетов синхронное по двум сторонам, например на вертикалях 17 и 16, а также выборочное, как на вертикалях 19 и 20. Отмечено текущее положение. Функция программы, выполняющая визуализацию карты посевов в терминале, представлена в листинге 3:

```
def roomview( tail=""):
    acc=f"\n\n---------------------------- room: {room} --------------------------------\n"
    ind_pl=0 # счетчик вертикальных координат
    for plantline in range (plant_hight,0,-1): # перебор возможных позиционных слотов
        acc+="00" # аккумулятор строки терминала
        ind_st=0 # счетчик горизонтальных координат
        for st in range (plant_width): # перебор и вывод навигационных слотов
            st1=st*2+1 # вычисление индекса для leftside массива
            lcolor = "" if leftside[ind_pl][ind_st] else "\x1b[3;42m" # колоризация слота
            st2=st*2+2 # вычисление индекса для rightside массива
            rcolor = "" if rightside[ind_pl][ind_st] else "\x1b[3;42m" # колоризация слота
            if st1==term_limit: # отработка лимитов вывода в терминал
                if st*2+1 == left_row and plant==plantline: acc += "|" + lcolor +
                  '{:02}'.format(st*2+1) + "\x1b[0m" # вывод слота
                else: acc += "|" + lcolor + '{:02}'.format(st*2+1) + "\x1b[0m" # вывод слота
            else:
                if st*2+1 == left_row and plant==plantline: acc += "|" + lcolor +
                  '{:02}'.format(st*2+1) + "\x1b[0m\x1b[3;32;43m^\x1b[0m" + rcolor +
                  '{:02}'.format(st*2+2) + "\x1b[0m" # вывод слота
                else: acc += "|" + lcolor + '{:02}'.format(st*2+1) + "\x1b[0m " + rcolor +
                  '{:02}'.format(st*2+2) + "\x1b[0m" # вывод слота
            ind_st+=1 # инкремент счетчика вертикальных позиций слотов
        ind_pl+=1 # инкремент счетчика горизонтальных позиций слотов
        acc+="\n" # накопление перевода строки в аккумуляторе терминального вывода
    print (acc, tail, "\n\033[12A") # вывод в терминал
```

В листинге 3 leftside и rightside – двумерные массивы, содержащие статус наполненности датасета по культуре в конкретной координате карты посевов условно левой и правой части гряд в теплицах; аргумент tail – ремарка последнего действия для вывода в терминал; глобальные переменные left_row – текущая горизонтальная позиция, учитываемая в датасете; plant – текущая вертикальная позиция, учитываемая в датасете.

В результате работы программы аугментации формируется отдельный датасет, имеющий формат для преобразования в базу обучения DIGITS. Описанная процедура применялась для формирования четырех датасетов: томаты – обзорные виды; томаты – укрупнено по потенциально пораженным и здоровым частям растения; огурцы – обзорные виды; огурцы – укрупнено по потенциально пораженным и здоровым частям растения.

Аугментированные датасеты размерностью 20 000–35 000 размеченных изображений загружены в базы данных DIGITS. Тренировка нейронной сети для определения применимости методов распознавания осуществлена средствами DIGITS с использованием фреймворка Caffe. Применена технология глубокого обучения сверточной нейронной сети моделью AlexNet [17], которая имеет настраиваемые параметры, основным из которых в рассматриваемом случае является функция обратной ошибки. Тестирова-

ние обучения нейронной сети выполнено с шестью различными методами оптимизации: AdaDelta (адаптивный дельта-градиент); RMSprop (среднеквадратичное распространение корня); AdaGrad (адаптивный градиент); NAG (адаптивный градиент Нестерова); Adam (адаптивная оценка момента); SGD (стохастический градиентный спуск).

Для определения оптимальной эпохи, после которой эффективность обучения либо снижается, либо наступает переобучение, исходя из проведенных исследований, с запасом выбрано 20 эпох. Для дополнительного визуализирования момента снижения корректирующих веса воздействий выбран ступенчатый шаг снижения воздействия на веса. Итоговое сравнение выполнено по результатам параметров выходных данных в процессе обучения.

При обучении модели AlexNet с функцией обратной ошибки AdaDelta уже после 1-й эпохи наблюдается отсутствие прогресса в шкале точности. Кроме того, несмотря на снижение коэффициента воздействия, колебания весов практически не изменяются вплоть до 20-й эпохи. При обучении модели AlexNet с функцией обратной ошибки RMSprop точность показателей достигает более 98 % к 5-й эпохе обучения, воздействие функции обратной ошибки в районе 5-й эпохи также снижается, при этом воздействие функции обратной ошибки к 20-й эпохе менее 0,05. При обучении модели AlexNet с функцией обратной ошибки AdaGrad точность показателя достигает более 95 % к 8-й эпохе обучения, воздействие функции обратной ошибки после 10-й эпохи не имеет тенденции к снижению. После 5-й эпохи при обучении модели AlexNet с функцией обратной ошибки NAG наблюдается отсутствие прогресса в шкале точности, которая не превысила 90 %. Кроме того, несмотря на снижение коэффициента воздействия, колебания весов практически не изменяются с 10-й эпохи и имеют среднее значение более 0,3. При обучении модели AlexNet с функцией обратной ошибки Adam точность показателей достигает более 98 % к 6-й эпохе обучения, воздействие функции обратной ошибки в районе 4-й эпохи также снижается и плавно продолжает затухать. По результату обучения модели AlexNet с функцией обратной ошибки SGD точность показателей достигает более 97 % к 7-й эпохе обучения, воздействие функции обратной ошибки в районе 5-й эпохи также снижается, но составляет более 0,1.

Таким образом, можно выделить высокую скорость обучения до затухания роста точности валидации в случаях RMSprop, Adam, SGD. Отметим, что во всех трех случаях эпоха достижения указанных результатов более ранняя.

Экспериментальный образец роботизированной системы тепличного растениеводства (рис. 4) оснащен разработанной мобильной частью когнитивного модуля искусственного интеллекта. Образец включает в себя мобильную самоходную базу с органами управления и сенсорики для автомати-



Рис. 4. Экспериментальный образец роботизированной системы тепличного растениеводства
Fig. 4. Experimental sample of a robotic system for greenhouse crop production

ческого движения по грядам посевов, набор инструкций по автоматическому развороту и перемещению к следующей итерации перемещения по посевам, возврат на базу.

Заключение. Полученные результаты применения роботизированной системы тепличного растениеводства и программного обеспечения показали следующее. Разработанный потоковый алгоритм функционирования мобильной части когнитивного модуля роботизированного комплекса растениеводства обеспечивает заданные функциональные возможности на основе применения технологии глубокого обучения сверточной нейронной сети модели AlexNet.

Литература

1. Паспорт Национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации»: утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. № 16) // Правительство России [Электронный ресурс]. URL: http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cNLo6gczMkPF.pdf (дата обращения: 05.10.2022).

2. Ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство» / ***А. В. Гордеев, Д. Н. Патрушев, И. В. Лебедев и др.*** М.: Росинформагротех, 2019. 48 с.

3. Machine learning and artificial intelligence: definitions, applications, and future directions / ***J. M. Helm, A. M. Swiergosz, H. S. Haeberle et al.*** // Curr. Rev. Musculoskelet. Med. 2020. Vol. 13. P. 69–76. https://doi.org/10.1007/s12178-020-09600-8

4. Развитие искусственного интеллекта // Министерство экономического развития Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: https://www.economy.gov.ru/material/departments/d01/razvitie_iskusstvennogo_intellekta/ (дата обращения: 21.04.2022).

5. ***Dokic K., Blaskovic L., Mandusic D.*** From machine learning to deep learning in agriculture – the quantitative review of trends // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 614. Art. ID: 012138. https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012138

6. Computer vision technology in agricultural automation – a review / ***H. Tian, T. Wang, Y. Liu et al.*** // Information Processing in Agriculture. 2020. Vol. 7. Iss. 1. P. 1–19. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006

7. Prediction of end-of-season tuber yield and tuber set in potatoes using in-season UAV-based hyperspectral imagery and machine learning / ***C. Sun, L. Feng, Z. Zhang et al.*** // Sensors. 2020. Vol. 20 (18). Art.
No. 5293. https://doi.org/10.3390/s20185293

8. ***Алферьев Д. А.*** Практика реализации сверточных нейронных сетей в сельском хозяйстве и агропромышленном комплексе // АгроЗооТехника [сетевое изд.]. 2020. Т. 3. № 2. С. 1–10. https://doi.org/10.15838/alt.2020.3.2.4 URL: http://azt-journal.ru/article/28585 (дата обращения: 05.10.2022).

9. ***Hamuda E., Glavin M., Jones E.*** A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 125. P. 184–199. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.024

10. ***Ahmad M., Abdullah M., Moon H., Han D.*** Plant disease detection in imbalanced datasets using efficient convolutional neural networks with stepwise transfer learning // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 140565–140580. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119655

11. A patch-image based classification approach for detection of weeds in sugar beet crop / ***S. I. Moazzam, U. S. Khan, W. S. Qureshi et al.*** // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 121698–121715. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109015

12. ***Abdulridha J., Ampatzidis Y., Kakarla S. C., Roberts P.*** Detection of target spot and bacterial spot diseases in tomato using UAV-based and benchtop-based hyperspectral imaging techniques // Precision Agric. 2020. Vol. 21. P. 955–978. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09703-4

13. ***Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б., Бельченко И. К.*** Автоматизация процессов ухода за растениями на базе технологии машинного зрения // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2021. № 2 (32). С. 151–160. https://doi.org/10.35264/1996-2274-2021-2-151-160

14. ***Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б., Бельченко И. К.*** Повышение эффективности автоматического ухода за сельскохозяйственными культурами на основе применения машинного зрения и методов искусственного интеллекта // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № S7 (107). С. 650–651. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.650.651

15. ***Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б.*** Программно-аппаратный комплекс для растениеводства с использованием искусственного интеллекта // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 11 марта 2022 г.). М.: ИП Овчинников Михаил Артурович, 2022. С. 51–55. https://doi.org/10.34755/IROK.2022.12.94.098

16. ***Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б., Бельченко И. К.*** Применение машинного зрения и методов искусственного интеллекта в роботизированной системе ухода за растениями // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № S8-2 (113). С. 481–488. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.481.488

17. ***Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. I.*** ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Proc. 25th International Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NIPS'12). Vol. 1. Red Hook, NY: Curran Associates Inc., 2012. P. 1097–1105.

Статья поступила в редакцию 15.07.2022 г.; одобрена после рецензирования 26.07.2022 г.; принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Кирьянов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «ЭРЛАБ» (Россия, 129090, г. Москва, Большая Сухаревская пл., 9), 5079311@mail.ru

Беневоленский Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института – Республиканского исследовательского научно-консультационного центра экспертизы (Россия, 123317, г. Москва, ул. Антонова-Овсеенко,13, стр.1), sbb640@gmail.com

Сироткин Владимир Юрьевич – ведущий инженер ООО «ЭРЛАБ» (Россия, 129090, г. Москва, Большая Сухаревская пл., 9), 5183637@mail.ru

References

1. Passport of national program "Digital Economy of the Russian Federation", approved by Presidium of RF Presidential Council for Strategic Development and National Projects (protocol of Dec. 24, 2018 No. 16). *Pravitel'stvo Rossii = Government of Russia.* (In Russian). Available at: http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cNLo6gczMkPF.pdf (accessed: 05.10.2022).

2. Gordeyev A. V., Patrushev D. N., Lebedev I. V., Arkhipov A. G., Bulanov K. A., Greben'kov D. V., Kosogor S. N. *Industry-sponsored project "Digital Farming".* Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2019. 48 p. (In Russian).

3. Helm J. M., Swiergosz A. M., Haeberle H. S., Karnuta J. M., Schaffer J. L., Krebs V. E., Spitzer A. I., Ramkumar P. N. Machine learning and artificial intelligence: definitions, applications, and future directions. *Curr. Rev. Musculoskelet. Med.,* 2020, vol. 13, pp. 69–76. https://doi.org/10.1007/s12178-020-09600-8

4. Artificial intelligence development. *Ministerstvo ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii = Ministry of Economic Development of the Russian Federation.* (In Russian). Available at: https://www.economy.gov.ru/material/departments/d01/razvitie_iskusstvennogo_intellekta/ (accessed: 21.04.2022).

5. Dokic K., Blaskovic L., Mandusic D. From machine learning to deep learning in agriculture – the quantitative review of trends. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.,* 2020, vol. 614, art. ID: 012138. https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012138

6. Tian H., Wang T., Liu Y., Qiao X., Li Y. Computer vision technology in agricultural automation – a review. *Information Processing in Agriculture,* 2020, vol. 7, iss. 1, pp. 1–19. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006

7. Sun C., Feng L., Zhang Z., Ma Y., Crosby T., Naber M., Wang Y. Prediction of end-of-season tuber yield and tuber set in potatoes using in-season UAV-based hyperspectral imagery and machine learning. *Sensors,* 2020, vol. 20 (18), art. no. 5293. https://doi.org/10.3390/s20185293

8. Alfer'ev D. A. Practic of implementing convolutional neural networks in agriculture and agro-industrial complex. *AgroZooTekhnika = Agricultural and Livestock Technology,* 2020, vol. 3, no. 2, pp. 1–10. (In Russian). https://doi.org/10.15838/alt.2020.3.2.4 Available at: http://azt-journal.ru/article/28585 (accessed: 05.10.2022).

9. Hamuda E., Glavin M., Jones E. A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. *Computers and Electronics in Agriculture,* 2016, vol. 125, pp. 184–199. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.024

10. Ahmad M., Abdullah M., Moon H., Han D. Plant disease detection in imbalanced datasets using efficient convolutional neural networks with stepwise transfer learning. *IEEE Access,* 2021, vol. 9, pp. 140565–140580. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119655

11. Moazzam S. I., Khan U. S., Qureshi W. S., Tiwana M. I., Rashid N., Alasmary W. S., Iqbal J., Hamza A. A patch-image based classification approach for detection of weeds in sugar beet crop. *IEEE Access,* 2021, vol. 9, pp. 121698–121715. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109015

12. Abdulridha J., Ampatzidis Y., Kakarla S. C., Roberts P. Detection of target spot and bacterial spot diseases in tomato using UAV-based and benchtop-based hyperspectral imaging techniques. *Precision Agric.,* 2020, vol. 21, pp. 955–978. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09703-4

13. Kiryanov A. A., Benevolensky S. B., Belchenko I. K. Automation of plant care processes based on machine vision technology. *Innovatika i ekspertiza: nauchnyye trudy,* 2021, no. 2 (32), pp. 151–160. (In Russian). https://doi.org/10.35264/1996-2274-2021-2-151-160

14. Kir'yanov A. A., Benevolenskii S. B., Bel'chenko I. K. Improving the efficiency of automatic care of agricultural crops based on the use of machine vision and artificial intelligence methods. *Nanoindustriya = Nanoindustry,* 2021, vol. 14, no. S7 (107), pp. 650–651. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.650.651

15. Kir'yanov A. A., Benevolenskii S. B. Software and hardware complex for plant production using artificial intelligence. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii = Current trends in science and world community in the era of digitalization,* proceedings of 5th International research-to-practice conference (Moscow, 11 Mar. 2022). Moscow, IP Ovchinnikov Mikhail Arturovich Publ., 2022, pp. 51–55. (In Russian). https://doi.org/10.34755/IROK.2022.12.94.098

16. Kir'yanov A. A., Benevolenskii S. B., Bel'chenko I. K. Applying machine vision and methods of artificial intelligence in a robotic plant care system. *Nanoindustriya = Nanoindustry,* 2022, vol. 15, no. S8-2 (113), pp. 481–488. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.481.488

17. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. I. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Proc. 25th International Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NIPS'12),* vol. 1. Red Hook, NY, Curran Associates Inc., 2012, pp. 1097–1105.

The article was submitted 15.07.2022; approved after reviewing 26.07.2022;
accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Aleksander A. Kir'yanov – Cand. Sci. (Eng.), General Director, "ERLAB" LLC (Russia, 129090, Moscow, Bolshaya Sukharevskaya sq., 9), 5079311@mail.ru

Sergey B. Benevolenskii – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Russia, 123317, Moscow, Antonov-Ovseenko st., 13, bld. 1), sbb640@gmail.com

Vladimir Yu. Sirotkin – Senior Engineer, "ERLAB" LLC (Russia, 129090, Moscow, Bolshaya Sukharevskaya sq., 9), 5183637@mail.ru

Научная статья
УДК 004.932.4
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-6-807-818

Подавление белого шума на изображениях на основе винеровской фильтрации в области дискретного вейвлет-преобразования с применением нейросетевых технологий

К. А. Алимагадов, С. В. Умняшкин

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

vrinf@miee.ru

Аннотация. Алгоритмы компьютерного зрения находят широкое применение при решении ряда прикладных задач. Корректность работы таких алгоритмов зависит от поступающих им на вход фото- и видеоданных, подверженных влиянию шумов, поэтому подавление шумов – важный этап низкоуровневой обработки цифровых изображений. В работе исследована винеровская фильтрация нормального белого шума в области дискретного вейвлет-преобразования с применением нейронных сетей. Приведены описания архитектуры сетей, а также разработанного алгоритма их применения для фильтрации в области дискретного вейвлет-преобразования. Предложенный алгоритм протестирован на наборе данных BSDS500 при различных уровнях шума. Качество фильтрации оценено по вычисленным значениям отношения сигнал / шум (SNR) и индекса структурного сходства (SSIM). Результаты обработки тестовых изображений свидетельствуют о том, что разработанный алгоритм превосходит по качеству шумоподавления винеровскую фильтрацию в области дискретного вейвлет-преобразования без использования нейронных сетей и большинство других рассмотренных фильтров.

Ключевые слова: подавление шумов, фильтр Винера, вейвлет-фильтрация, белый шум, фильтрация изображений, нейронные сети

Для цитирования: Алимагадов К. А., Умняшкин С. В. Подавление белого шума на изображениях на основе винеровской фильтрации в области дискретного вейвлет-преобразования с применением нейросетевых технологий // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 807–818. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-807-818

© К. А. Алимагадов, С. В. Умняшкин, 2022

Original article

White noise suppression based on Wiener filtering using neural networks technologies in the domain of discrete wavelet transform

K. A. Alimagadov, S. V. Umnyashkin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

vrinf@miee.ru

Abstract. Computer vision algorithms are widely used in solving a number of applied problems. Correctness of these algorithms depends on input photo and video data sensitive to noise impact. For this reason noise suppression is an important step in low-level digital image processing. In this work Wiener filtering of normal white noise using neural networks in the domain of discrete wavelet transform is investigated. A description of the networks architecture and a developed algorithm of their application for filtering in the domain of discrete wavelet transform are given. The proposed algorithm was tested on a dataset BSDS500 noised with various noise levels. Quality of filtering has been evaluated by calculated values of signal-to-noise ratio (SNR) and structural similarity index (SSIM). Results of test images processing indicate that the quality of noise suppression of the developed algorithm outperforms Wiener filtering in the discrete wavelet transform domain without using neural networks and most of other considered algorithms.

Keywords: noise suppression, Wiener filter, wavelet filtration, white noise, image denoising, neural networks

For citation: Alimagadov K. A., Umnyashkin S. V. White noise suppression based on Wiener filtering using neural networks technologies in the domain of discrete wavelet transform. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 807–818. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-807-818

Введение. Среди методов подавления шумов на изображениях можно выделить три группы: пространственные, частотные и пространственно-частотные. При использовании пространственных методов снижение уровня шумов происходит за счет непосредственной обработки пикселей изображения. В основе частотных методов лежит применение преобразования, переводящего изображение в спектральную область, где и проводится обработка. Пространственно-частотные методы подавления шумов также основаны на обработке некоторого обобщенного спектра изображения. Однако в этом случае преобразование позволяет локализовать сигнал (изображение) одновременно как в частотной, так и в пространственной области, что дает возможность использовать преимущества пространственных и частотных методов. Пространственно-частотными являются, например, вейвлет-преобразования [1].

В работе [2] показано, что применение фильтра Винера в базисе дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) позволило получить сопоставимые (а в отдельных случаях и превосходящие) результаты фильтрации по сравнению с ее аналогом в базисе дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Цель настоящей работы – развитие подхода, описанного в статье [2]. При формировании частотной характеристики фильтра Винера в области ДВП предлагается использовать сверточные нейронные сети для получения оценки ДВП-спектра мощности полезного сигнала, а также учитывать информацию о контурах изображения. Рассматривается ДВП, реализуемое биортогональными фильтрами 9/7 [2, 3].

Винеровская фильтрация белого аддитивного гауссова шума. Дискретные полутоновые изображения будем представлять в виде матриц, элементы которых определяют яркость пикселей. В рамках исследования рассматривается модель белого аддитивного гауссова шума, не коррелированного с изображением. Искажение изображения аддитивным шумом в формализованном виде описывается выражением

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y) \tag{1}$$

или в матричном виде

$$\mathbf{G} = \mathbf{F} + \mathbf{N},$$

где $\mathbf{G} = \big(g(x, y)\big)$, $\mathbf{F} = \big(f(x, y)\big)$ и $\mathbf{N} = \big(\eta(x, y)\big)$ – зашумленное изображение, исходное изображение и шум соответственно [4].

Считаем, что значения функций в (1) – случайные величины. Задача подавления шумов заключается в такой обработке (преобразовании) изображения $\mathbf{G}$, чтобы полученное из него в результате изображение $\hat{\mathbf{F}}$ как можно точнее приближало оригинальное изображение $\mathbf{F}$. В качестве мер сходства изображений используем отношение сигнал / шум (SNR) [4] и индекс структурного сходства (SSIM) [5].

Белый шум имеет спектр мощности, равный константе, т. е. его энергия равномерно распределена по всем частотам [1]. Для модели нормального шума $\eta(x, y)$ – случайная величина, плотность распределения которой задается законом Гаусса:

$$\rho(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где μ – математическое ожидание (обычно $\mu = 0$); σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) [4].

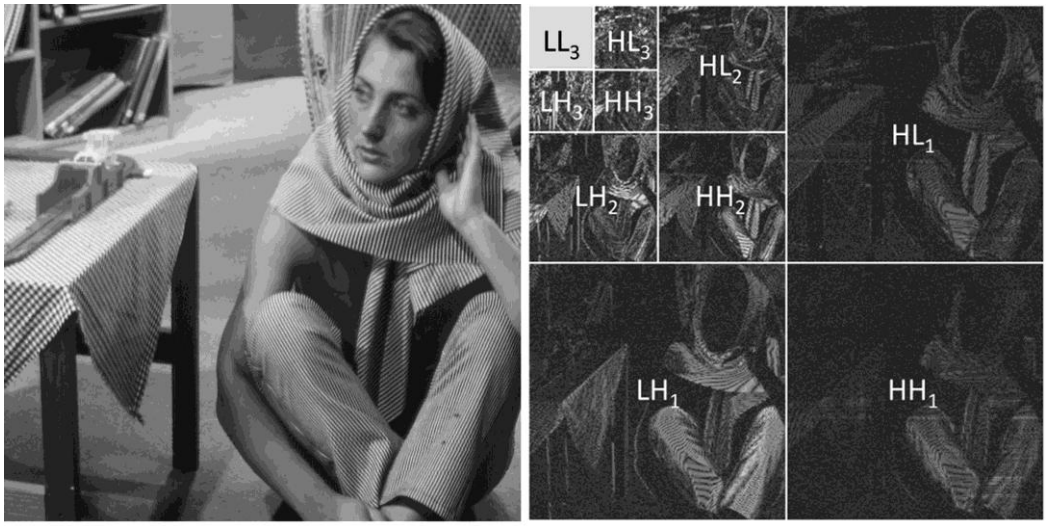
Обозначим матрицу яркостей пикселей полутонового зашумленного изображения как $\mathbf{G} = (g_{m,n})$, а его двумерный ДВП-спектр – как $\mathbf{W} = (w_{k,l})$, $\mathbf{W} = \text{ДВП}(\mathbf{G})$. Пример ДВП-спектра изображения и используемые обозначения для его саббэндов представлены на рис. 1.

ДВП-спектром мощности назовем математическое ожидание квадратов ДВП-коэффициентов. Для дискретного белого шума $\mathbf{N} = (\eta_{m,n})$ с нулевым средним $\text{M}[\eta_{m,n}] = 0$ и дисперсией $\text{M}[\eta_{m,n}^2] = \sigma_V^2$ его ДВП-спектр мощности является постоянным, т. е. $\forall k, l:\ \text{M}[\omega_{k,l}^2] = \sigma^2$, где $\mathbf{V} = (\omega_{k,l}) = \text{ДВП}(\mathbf{N})$.

По аналогии с ДПФ [1, стр. 308] и с учетом того, что для исходного изображения $\mathbf{F} = \mathbf{G} - \mathbf{N}$, а также в силу некоррелированности изображения и шума в ДВП-спектре мощности имеем

$$\text{M}[s_{k,l}^2] = \text{M}[w_{k,l}^2] - \sigma^2,$$

где $\mathbf{S} = (s_{k,l}) = \text{ДВП}(\mathbf{F})$.



а *б*

Рис. 1. Изображение Barbara (*а*) и его трехуровневый ДВП-спектр (*б*)
Fig. 1. Image Barbara (*a*) and its three-level discrete wavelet transform spectrum (*b*)

В области ДВП коэффициенты фильтра Винера (аналог частотной характеристики) находятся по следующей формуле:

$$W(k,l)=\frac{\mathrm{M}[s_{k,l}^2]}{\mathrm{M}[s_{k,l}^2]+\sigma^2}=\frac{\mathrm{M}[w_{k,l}^2]-\sigma^2}{\mathrm{M}[w_{k,l}^2]}=1-\frac{\sigma^2}{\mathrm{M}[w_{k,l}^2]}, \quad (2)$$

где $\mathrm{M}[w_{k,l}^2]$ – ДВП-спектр мощности зашумленного изображения $\mathbf{G}$; $\sigma^2=\mathrm{M}[\omega_{k,l}^2]$ – ДВП-спектр мощности шума.

Реализация фильтра Винера в области ДВП. Разработанный алгоритм фильтрации состоит из следующих шагов (входным изображением является $\mathbf{G}$, выходным – $\hat{\mathbf{F}}$).

Шаг 1. Вычисление ДВП-спектра $\mathbf{W}=\text{ДВП}(\mathbf{G})$ зашумленного изображения.

Шаг 2. Разделение вейвлет-коэффициентов $w_{k,l}$ ДВП-спектра $\mathbf{W}$ на два класса: «контурные» или «фоновые». При фильтрации вейвлет-коэффициенты, принадлежащие разным классам, будут обрабатываться независимо.

Шаг 3. Нахождение по ДВП-спектру $\mathbf{W}$ зашумленного изображения с использованием нейронных сетей оценки $\hat{s}_{k,l}$ значений вейвлет-коэффициентов $s_{k,l}$ ДВП-спектра $\mathbf{S}=\text{ДВП}(\mathbf{F})$ незашумленного изображения.

Шаг 4. Вычисление по оценкам $\hat{s}_{k,l}$ с помощью формулы (2) коэффициентов фильтра Винера: $W(k,l)=\overline{\hat{s}_{k,l}^2}\Big/\left(\overline{\hat{s}_{k,l}^2}+\sigma^2\right)$, где $\overline{\hat{s}_{k,l}^2}=C_\alpha\sum_{i=-2}^{2}\sum_{j=-2}^{2}\exp\left(-\frac{i^2+j^2}{\alpha}\right)\hat{s}_{k+i,l+j}^2$. Значение параметра $\alpha = 1$ подобрано эмпирически, а константа C_α находится из условия $C_\alpha\sum_{i=-2}^{2}\sum_{j=-2}^{2}\exp\left(-\frac{i^2+j^2}{\alpha}\right)=1$.

Шаг 5. Фильтрация ДВП-спектра путем умножения каждого вейвлет-коэффициента зашумленного изображения на соответствующий коэффициент фильтра Винера: $\hat{w}_{k,l}=W(k,l)w_{k,l}$, в результате чего получается преобразованный ДВП-спектр $\hat{\mathbf{W}}=(\hat{w}_{k,l})$.

Шаг 6. Выполнение для получения изображения $\hat{\mathbf{F}}$ обратного ДВП: $\hat{\mathbf{F}}=\text{ОДВП}(\hat{\mathbf{W}})$.

На первом шаге алгоритма выполняется трехуровневое ДВП, аналогичное примеру, приведенному на рис. 1. Выбор большего количества уровней преобразования не приводит к видимому улучшению качества изображений как визуального, так и по мерам SNR и SSIM. Описанная обработка ДВП-спектра не затрагивает саббэнд LL_3.

Вейвлет-коэффициенты контурных и фоновых областей саббэндов ДВП-спектра имеют различный характер статистических связей. Поэтому на шаге 2 для получения более качественных результатов обработки осуществляется классификация вейвлет-коэффициентов ДВП на контурные и фоновые по алгоритму, представляющему собой некоторую модификацию подхода из [6] и включающему в себя следующие действия.

1. Для каждого внутреннего (неграничного) вейвлет-коэффициента $w_{k,l}$ каждого обрабатываемого саббэнда (LH, HL или HH) вычисляется взвешенная сумма $S = S(w_{k,l}) = \sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1} r_{i,j} w_{k+i,l+j}$ этого вейвлет-коэффициента с его соседями, где используются веса $\mathbf{R} = \left(r_{i,j}\right)_{i,j=-1}^{1}$:

$$\mathbf{R}_{\mathrm{LH}} = \begin{pmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{R}_{\mathrm{HH_1}} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{\mathrm{HL}} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{R}_{\mathrm{HH_2}} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{pmatrix}.$$

При классификации вейвлет-коэффициентов HH-саббэндов используются две маски весов, так как в этих саббэндах проявляются два типа диагональных контуров, которые детектируются каждый своей маской.

2. Полученное для $w_{k,l}$ значение модуля суммы $|S|$ сравнивается с двумя эмпирически подобранными порогами $T_1 = 7{,}2\,\sigma_{subb}$ и $T_2 = 8{,}5\,\sigma_{subb}$, где σ_{subb} – СКО вейвлет-коэффициентов соответствующего саббэнда. Вейвлет-коэффициенты, для которых выполняется неравенство $|S| > T_2$, помечаются как контурные, а для которых $T_2 \ge |S| > T_1$, помечаются как контурные, если среди их восьми соседей есть хотя бы один, для которого справедливо $|S| > T_2$.

3. В результате выполнения п.п. 1, 2 для каждого саббэнда формируется бинарное изображение, на котором контурные коэффициенты имеют единичное значение (true), фоновые коэффициенты – нулевое (false). С этими бинарными изображениями контуров выполняется морфологическая операция размыкания с примитивами:

$$\mathbf{P}_{\mathrm{LH}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_{\mathrm{HL}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_{\mathrm{HH_1}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_{\mathrm{HH_2}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Множество контурных вейвлет-коэффициентов саббэндов HH получается путем объединения множеств помеченных на предыдущем шаге вейвлет-коэффициентов, которые найдены с помощью весовых масок $\mathbf{R}_{HH_1}$ и $\mathbf{R}_{HH_2}$, после выполнения над ними операции размыкания с примитивами $\mathbf{P}_{HH_1}$ и $\mathbf{P}_{HH_2}$ соответственно. Размыкание позволяет снизить влияние шумов и получить более четкие контуры.

Классификация вейвлет-коэффициентов на контурные и фоновые выполняется как при обучении сетей, так и при их непосредственном использовании. Пример саббэнда LH_2 изображения Butterfly (исходного и зашумленного) и результат применения к нему алгоритма выделения контурных вейвлет-коэффициентов представлены на рис. 2.

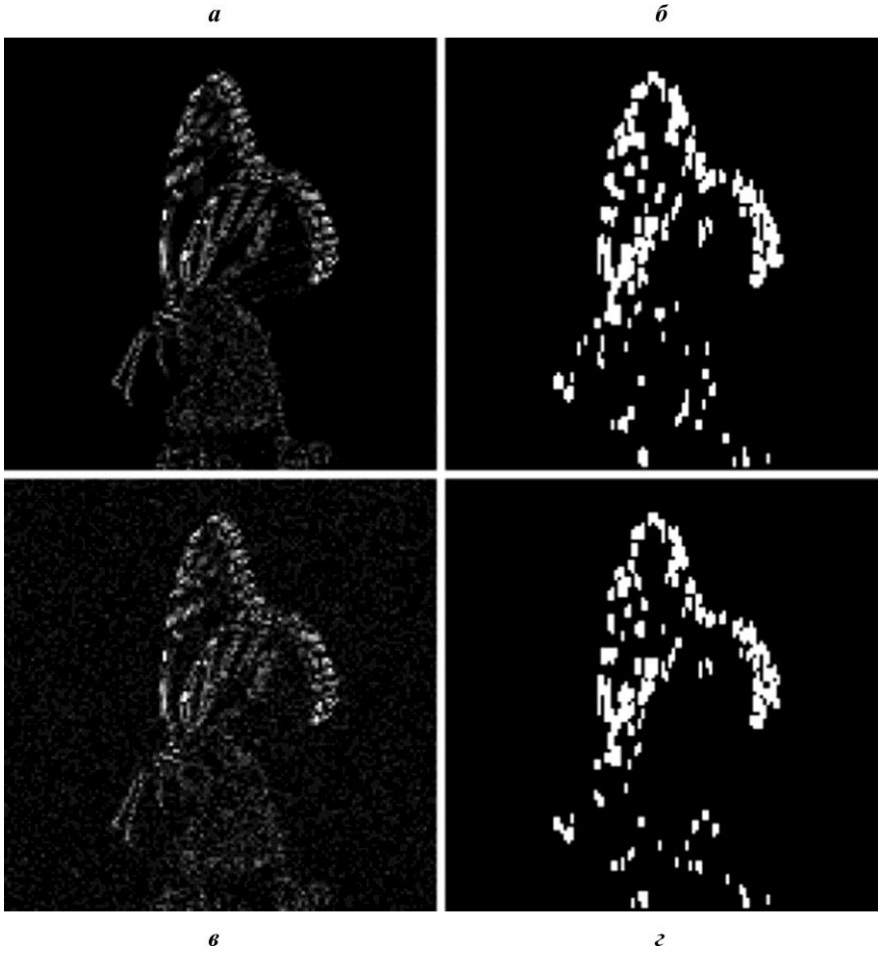


Рис. 2. Саббэнд LH_2 исходного (*а*) и зашумленного (*в*) изображений Butterfly и помеченные для них контурные вейвлет-коэффициенты (*б*, *г* соответственно)
Fig. 2. Subband LH_2 of the original (*a*) and noised (*c*) image Butterfly and its marked contour wavelet-coefficients (*b*, *d* respectively)

На шаге 3 оценки $\hat{s}_{k,l}$ вейвлет-коэффициентов ДВП-спектра незашумленного изображения предлагается формировать с помощью нейронной сети. Для этого саббэнды наблюдаемого ДВП-спектра **W** зашумленного изображения покрываются перекрывающимися областями размером 5×5 вейвлет-коэффициентов. Затем каждый набор из 25 вейвлет-коэффициентов рассматриваемой области подается на вход нейронной сети, на выходе которой ожидается получить оценку незашумленного значения центрального из них (рис. 3).



Рис. 3. Входной образ и отклик нейронной сети
Fig. 3. Input wavelet coefficients set and response of the neural network

Используемая нейросетевая модель. Для получения оценок $\hat{s}_{k,l}$ вейвлет-коэффициентов ДВП исходного изображения по вейвлет-коэффициентам $w_{k,l}$ ДВП зашумленного изображения (шаг 3 алгоритма фильтрации) предлагается использовать нейронную сеть (рис. 4), имеющую два сверточных слоя, между которыми применяется функция активации вида

$$\varphi_{m,\lambda}(x) = \frac{x^{2m+1}}{x^{2m} + \lambda^{2m}}. \qquad (6)$$

Архитектура данной сети разработана по аналогии с подходом, изложенным в работе [7]. Нетрудно показать, что функция (6) имеет следующее свойство [7]:

$$\forall \lambda \neq 0,\ \forall \tilde{\lambda} \neq 0: \quad \varphi_{m,\lambda}(x) = \frac{\lambda}{\tilde{\lambda}} \varphi_{m,\tilde{\lambda}}\left(\frac{\tilde{\lambda}}{\lambda} x\right).$$

Поэтому необходимость точного ручного подбора параметра λ отпадает, так как в процессе градиентного спуска веса слоев настроятся таким образом, что за счет линейных преобразований аргумента и значения $\varphi_{m,\lambda}(x)$ на выходе сети получим отклик, который будет оптимальным в смысле минимума функции потерь, используемой при обучении. Начальное значение параметра λ выбрано по аналогии с работой [7]: $\lambda = 3\sigma_V$, где $\sigma_V = 15$ – СКО рассмотренного в экспериментальных тестах шума среднего уровня. График функции (6) является своего рода обобщением (промежуточной формой) классических «жесткого» и «мягкого» пороговых фильтров, используемых для фильтрации

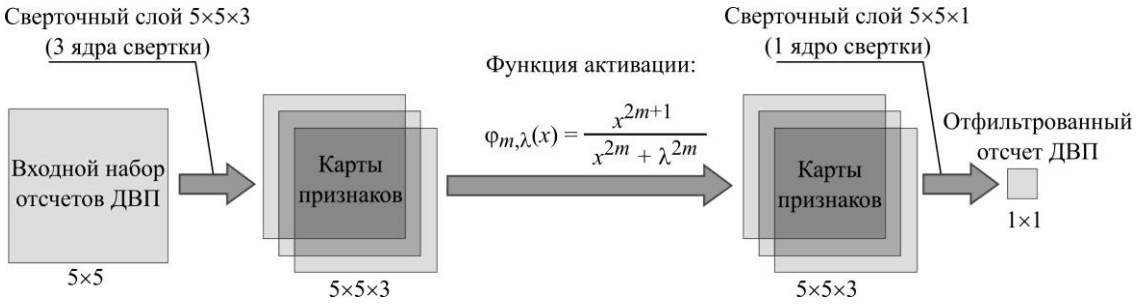


Рис. 4. Архитектура нейронной сети
Fig. 4. Architecture of the neural network

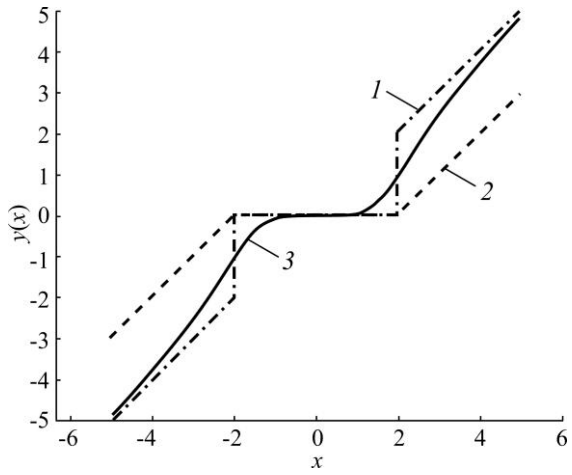


Рис. 5. Графики функций, задающих жесткую (кривая *1*) и мягкую (кривая *2*) пороговые фильтрации, и функции $\varphi_{2,\lambda}(x)$ (кривая *3*)
Fig. 5. Graphs of the functions defining hard (curve *1*) and soft (curve *2*) thresholding and the function $\varphi_{2,\lambda}(x)$ (curve *3*)

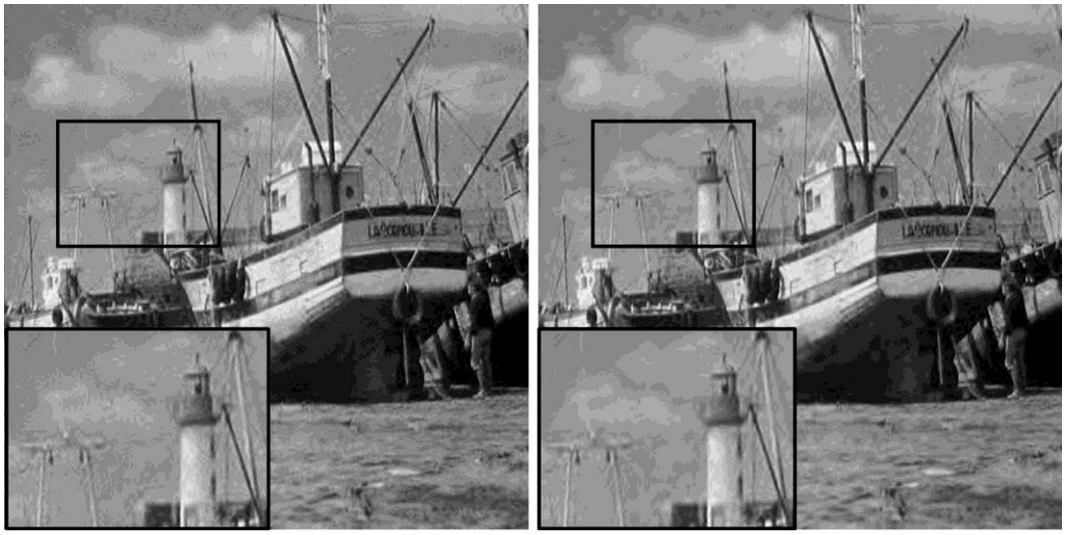
шумов в области ДВП [8] (рис. 5). Приведенные на рис. 4 параметры сети (размерность слоев, количество сверточных ядер, а также значение параметра функции активации $m = 2$) подобраны эмпирически так, чтобы результат фильтрации обеспечивал наибольший рост значений SNR и SSIM.

Для обучения и тестирования модели использовали набор из 30 полутоновых изображений размером 512×512 пикселей с разрядностью 8 бит/пиксель. Исходный набор изображений был разбит на обучающую и тестовую выборки: 25 изображений в обучающей выборке, 5 – в тестовой. В качестве образов, поступающих на вход сети, использовали наборы из 25 соседних вейвлет-коэффициентов ДВП-спектра зашумленного изображения. Каждому образу была поставлена в соответствие метка – центральный вейвлет-коэффициент из 25 рассматриваемых, взятый из ДВП-спектра незашумленного изображения. Для каждого обрабатываемого саббэнда (саббэнд LL_3 обработке не подвергали) обучались по две нейронных сети, одна – для фильтрации контурных вейвлет-коэффициентов, вторая – для фильтрации фоновых. Таким образом, для фильтрации изображения с использованием трехуровневого ДВП необходимо всего 18 сетей. В соответствии с рекомендациями по соотношению объема обучающей выборки N_{tr} и числа обучаемых параметров N_p из [9] (отношение N_{tr} / N_p должно быть не менее 30) при обучении моделей для каждого саббэнда использован объем обучающих данных, достаточный, чтобы избежать рисков переобучения.

Обучение проводили с помощью алгоритма Adam [10] со значениями параметров: $\alpha = 0{,}01$; $\beta_1 = 0{,}9$; $\beta_2 = 0{,}999$; $\varepsilon = 10^{-8}$. Размер одного батча обучающей выборки выбран равным 2048. В качестве функции потерь использовали среднеквадратическую ошибку. Количество эпох обучения выбрано равным 150. При большем числе эпох обучения уменьшения функции потерь не наблюдалось.

Результаты экспериментов. Пример винеровской фильтрации в области ДВП (с использованием нейронных сетей, а также с помощью алгоритма, приведенного в [2]) изображения Boat, зашумленного аддитивным нормальным белым шумом с нулевым средним и СКО = 15, представлен на рис. 6.

Для сравнения эффективности описанного алгоритма фильтрации нормального белого шума с существующими аналогами при проведении тестов также рассмотрены: билатеральный фильтр [11], винеровская фильтрация в области ДПФ [2], винеровская фильтрация в области ДВП [2] и фильтрация на основе сети DCT2net [7]. Фильтры протестированы на пяти полутоновых изображениях размером 512×512 пикселей, широко используемых для проверки алгоритмов цифровой обработки (Barbara, Boat, Lena, Goldhill и Mandrill). Рассмотрены три уровня шума со значениями СКО, равными 7, 15 и 30 соответственно. Параметры фильтров подбирали таким образом, чтобы для заданного СКО шума обеспечить наибольший рост отношения сигнал / шум после обработки (в среднем по тестовым изображениям).



а *б*

Рис. 6. Результат фильтрации изображения Boat (SNR = 19,29 дБ, SSIM = 0,54) фильтром Винера в области ДВП: *а* – без использования нейронных сетей (SNR = 25,05 дБ, SSIM = 0,8); *б* – с использованием нейронных сетей (SNR = 25,42 дБ, SSIM = 0,82)

Fig. 6. Result of Wiener filtering of the image Boat (SNR = 19.29 dB, SSIM = 0.54): *a* – without the neural networks (SNR = 25.05 dB, SSIM = 0.8); *b* – using the neural networks (SNR = 25.42 dB, SSIM = 0.82)

Таблица 1

Значения SNR (дБ) до и после обработки фильтрами при разных значениях СКО шума

Table 1

Values of SNR (dB) before and after filtering with various values of noise standard deviation

Фильтр	Barbara	Boat	Lena	Goldhill	Mandrill
σ = 7					
SNR до обработки	25,3	25,88	25,93	24,85	25,66
Билатеральный фильтр	27,85	29,05	30,11	28,44	27,98
Фильтр Винера (ДПФ)	*29,12*	28,11	30,09	27,47	28,46
Фильтр Винера (ДВП)	28,97	29,15	30,87	28,58	*30,12*
Фильтр Винера (ДВП с сетями)	29,08	*29,30*	*31,16*	*28,74*	**30,21**
DCT2net	**29,86**	**29,88**	**31,63**	**29,43**	29,16
σ = 15					
SNR до обработки	18,69	19,29	19,44	18,26	19,05
Билатеральный фильтр	22,57	25,05	25,96	24,46	23,38
Фильтр Винера (ДПФ)	*25,46*	24,54	26,29	23,98	23,38
Фильтр Винера (ДВП)	24,34	25,05	26,46	24,29	24,69
Фильтр Винера (ДВП с сетями)	24,56	*25,42*	*26,92*	*24,65*	**24,86**
DCT2net	**26,03**	**26,58**	**27,89**	**25,70**	*24,84*
σ = 30					
SNR до обработки	12,84	13,40	13,67	12,39	13,09
Билатеральный фильтр	18,94	21,59	22,21	21,42	20,10
Фильтр Винера (ДПФ)	*22,26*	21,52	22,72	21,37	19,57
Фильтр Винера (ДВП)	20,36	21,32	22,09	20,77	20,26
Фильтр Винера (ДВП с сетями)	20,74	*22,09*	*23,02*	*21,65*	*20,62*
DCT2net	**22,39**	**23,55**	**24,32**	**22,76**	**21,15**

Примечание. Жирным шрифтом выделены наибольшие полученные значения SNR, курсивом – второй по убыванию результат после наибольшего SNR.

Как следует из табл. 1, в большинстве случаев фильтрация с помощью сети DCT2net позволяет получить наилучшие результаты обработки. Однако, уступая лишь DCT2net, винеровская фильтрация в области ДВП на основе сверточных сетей демонстрирует бóльшие значения SNR после обработки по сравнению с результатами других фильтров. В отличие от фильтрации в области ДПФ обработка в области ДВП не содержит комплексной арифметики и ее выполнение требует меньше вычислительных затрат. Разработанный алгоритм также протестирован на наборе данных BSDS500 [12, 13], который содержит 500 изображений объектов различной природы – людей, животных, пейзажей, растений и т. п. Поэтому значения мер качества, полученные на данном наборе, могут свидетельствовать об эффективности работы предложенного алгоритма на большом количестве различных классов изображений.

В ходе экспериментов на наборе BSDS500 рассмотрены три уровня шума со значениями СКО из предыдущих тестов. Фильтрации подвергались полутоновые версии изображений с разрядностью 8 бит/пиксель. Для сравнения качества обработки на тех же данных протестирован алгоритм винеровской фильтрации в области ДВП, описанный в работе [2]. Результаты тестирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения SNR и SSIM, полученные по 500 изображениям до и после фильтрации при различных значениях СКО шума

Table 2

Average values of SNR and SSIM obtained from 500 images before and after filtering with various values of noise standard deviation

Фильтр	SNR, дБ	SSIM
σ = 7		
Значение до обработки	24,58	0,80
Фильтр Винера (ДВП)	27,90	0,93
Фильтр Винера (ДВП с сетями)	28,07	0,93
σ = 15		
Значение до обработки	18,07	0,56
Фильтр Винера (ДВП)	23,15	0,83
Фильтр Винера (ДВП с сетями)	23,42	0,85
σ = 30		
Значение до обработки	12,26	0,32
Фильтр Винера (ДВП)	19,26	0,67
Фильтр Винера (ДВП с сетями)	19,74	0,72

Найденные значения SNR и SSIM позволяют сделать вывод о том, что предложенная винеровская фильтрация на основе нейронных сетей превосходит по качеству обработки алгоритм, описанный в [2]. Разработанный алгоритм является более предпочтительным средством для устранения нормального белого шума по сравнению с фильтрацией, рассмотренной в [2, 8], с точки зрения качества шумоподавления.

Заключение. Полученные в ходе тестовых экспериментов значения SNR и SSIM позволяют сделать вывод о том, что алгоритм винеровской фильтрации в области ДВП с применением сверточных нейронных сетей решает задачу подавления нормального белого шума лучше, чем большинство других рассмотренных алгоритмов. Модификация, учитывающая контурную информацию на изображении и использующая нейронные сети для получения оценки спектра мощности полезного сигнала, позволила улучшить результаты исходного алгоритма [2].

Предложенная архитектура сетей содержит на два порядка меньше обучаемых параметров, чем модель DCT2net: 154 против 28 561. Оценка $\hat{s}_{k,l}$ каждого вейвлет-

коэффициента (контурного или фонового) ДВП-спектра исходного изображения формируется как отклик лишь одной из 18 сетей, обученных для обработки саббэндов определенного вида и уровня, каждая из которых содержит по 154 параметра. Используемые алгоритмом фильтрации 18 нейросетевых моделей содержат всего 18·154 = 2772 обучаемых параметра.

Найденные оценки количества вычислительных операций свидетельствуют о том, что предложенный алгоритм винеровской фильтрации требует меньше примерно в 16 раз умножений, в 15 раз сложений и в 9 раз делений, чем обработка с помощью сети DCT2net. Таким образом, предложенный алгоритм фильтрации – более эффективное решение с точки зрения экономии вычислительных ресурсов.

Литература

1. ***Умняшкин С. В.*** Основы теории цифровой обработки сигналов. М.: Техносфера, 2021. 550 с.

2. ***Умняшкин С. В., Алимагадов К. А.*** Применение фильтра Винера для подавления аддитивного белого шума на изображениях: сравнение частотного и вейвлет-базисов // Передовое развитие современной науки: опыт, проблемы, прогнозы: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск: Новая наука, 2020. С. 21–27.

3. ***Antonini M., Barlaud M., Mathieu P., Daubechies I.*** Image coding using wavelet transform // IEEE Trans. on Image Proc. 1992. Vol. 1. Iss. 2. P. 205–220. https://doi.org/10.1109/83.136597

4. ***Gonzalez R. C., Woods R. E.*** Digital image processing. 4th ed. New York: Pearson Education, 2018. 1168 p.

5. ***Zhou Wang, Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P.*** Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13. Iss. 4. P. 600–612. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861

6. ***Kimlyk M., Umnyashkin S.*** Image denoising using discrete wavelet transform and edge information // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow; St. Petersburg: IEEE, 2018. P. 1823–1825. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317461

7. ***Herbreteau S., Kervrann C.*** DCT2net: an interpretable shallow CNN for image denoising // arXiv [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2107.14803 https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.14803 (дата обращения: 05.10.2022).

8. ***Alimagadov K. A., Umnyashkin S. V.*** Application of Wiener filter to suppress white noise in images: wavelet vs Fourier basis // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2021. P. 2059–2063. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396470

9. ***Haykin S.*** Neural networks and learning machines. 3rd ed. New York: Pearson, 2009. 936 p.

10. ***Kingma D. P., Ba J. L.*** Adam: a method for stochastic optimization // arXiv [Электронный ресурс]. 2014. URL: https://arxiv.org/abs/1412.6980v1 https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980 (дата обращения: 07.05.2022).

11. ***Tomasi C., Manduchi R.*** Bilateral filtering for gray and color images // Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271). Bombay: IEEE, 1998. P. 839–846. https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815

12. ***Arbeláez P., Maire M., Fowlkes C., Malik J.*** Contour detection and hierarchical image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2011. Vol. 33. Iss. 5. P. 898–916. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.161

13. Berkeley segmentation data set and benchmarks 500 (BSDS500) // Berkeley Computer Vision Group [Электронный ресурс]. URL: https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/resources.html (дата обращения: 15.06.2022).

Статья поступила в редакцию 14.09.2022 г.; одобрена после рецензирования 28.09.2022 г.; принята к публикации 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Алимагадов Курбан Алимагадович – аспирант кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alimagadovk@yandex.ru

Умняшкин Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vrinf@miee.ru

References

1. Umnyashkin S. V. *Fundamentals of the theory of digital signal processing.* Moscow, Tekhnosfera Publ., 2021. 550 p. (In Russian).

2. Umnyashkin S. V., Alimagadov K. A. Application of Wiener filter to suppress white noise in images: comparison of frequency and wavelet domains. *Peredovoye razvitiye sovremennoy nauki: opyt, problemy, prognozy = Advanced Development of Modern Science: Experience, Problems, Forecasts,* proceedings of II International research-to-practice conference. Petrozavodsk, Novaya nauka Publ., 2020, pp. 21–27. (In Russian).

3. Antonini M., Barlaud M., Mathieu P., Daubechies I. Image coding using wavelet transform. *IEEE Trans. on Image Proc.,* 1992, vol. 1, iss. 2, pp. 205–220. https://doi.org/10.1109/83.136597

4. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital image processing.* 4th ed. New York, Pearson Education, 2018. 1168 p.

5. Zhou Wang, Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing,* 2004, vol. 13, iss. 4, pp. 600–612. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861

6. Kimlyk M., Umnyashkin S. Image denoising using discrete wavelet transform and edge information. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus),* Moscow, St. Petersburg, IEEE, 2018, pp. 1823–1825. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317461

7. Herbreteau S., Kervrann C. DCT2net: an interpretable shallow CNN for image denoising. *arXiv.* 2021. Available at: https://arxiv.org/abs/2107.14803 https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.14803 (accessed: 05.10.2022).

8. Alimagadov K. A., Umnyashkin S. V. Application of Wiener filter to suppress white noise in images: wavelet vs Fourier basis. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).* St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2021, pp. 2059–2063. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396470

9. Haykin S. *Neural networks and learning machines.* 3rd ed. New York, Pearson, 2009. 936 p.

10. Kingma D. P., Ba J. L. Adam: a method for stochastic optimization. *arXiv.* 2014. Available at: https://arxiv.org/abs/1412.6980v1 https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980 (accessed: 07.05.2022).

11. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271).* Bombay, IEEE, 1998, pp. 839–846. https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815

12. Arbeláez P., Maire M., Fowlkes C., Malik J. Contour detection and hierarchical image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 2011, vol. 33, iss. 5, pp. 898–916. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.161

13. Berkeley segmentation data set and benchmarks 500 (BSDS500). *Berkeley Computer Vision Group.* Available at: https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/resources.html (accessed: 15.06.2022).

The article was submitted 14.09.2022; approved after reviewing 28.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

Information about the authors

Kurban A. Alimagadov – PhD student of the High Mathematics-1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alimagadovk@yandex.ru

Sergei V. Umnyashkin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the High Mathematics-1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vrinf@miee.ru

Тематический указатель статей, опубликованных в 2022 году

Материалы электроники

Куксин А. В., Глухова О. Е., Герасименко А. Ю. Электропроводящие каркасные материалы из углеродных нанотрубок. **Т. 27, № 1, с. 19–27.**

Лавров И. В., Бардушкин В. В., Яковлев В. Б., Бардушкин А. В. Моделирование диэлектрических характеристик синтактных материалов. **Т. 27, № 1, с. 7–18.**

Тимкаева Д. А. Моделирование транспортных свойств одномерного ван-дер-ваальсового гетероперехода, образованного углеродной нанотрубкой и нанотрубкой MoS_2. **Т. 27, № 3, с. 283–289.**

Тихонов Р. Д., Поломошнов С. А., Амеличев В. В., Черемисинов А. А., Потапов В. С., Горелов Д. В., Казаков Ю. В. Механические напряжения и магнитные свойства пленок NiFe и CoNiFe, полученных электрохимическим осаждением. **Т. 27, № 4, с. 427–438.**

Хамдохов З. М., Маргушев З. Ч., Калажоков З. Х., Калажоков Х. Х., Тленкопачев М. Р., Левин Д. Д., Лосанов Х. Х. Особенности структуры и состава пленок, полученных с помощью аэрозольного распыления растворов коллоидного графита. **Т. 27, № 5, с. 581–590.**

Царик К. А., Некрасов Н. П., Неволин В. К., Бобринецкий И. И. Особенности формирования структур подвешенного графена над массивом микроразмерных пор. **Т. 27, № 6, с. 707–714.**

Шомахов З. В., Налимова С. С., Аубекеров К., Гукетлов А. М., Мошников В. А. Влияние дефектов структуры поверхности наностержней оксида цинка на их газочувствительные свойства. **Т. 27, № 5, с. 571–580.**

Штерн М. Ю. Наноструктурированные термоэлектрические материалы для температур 200–1200 К, полученные искровым плазменным спеканием. **Т. 27, № 6, с. 695–706.**

Технологические процессы и маршруты

Алексеев А. В., Каковкина Ю. И., Кузьмин Д. А., Рязанов Р. М., Столбов Д. Н., Лебедев Е. А., Громов Д. Г. Электрофоретическое осаждение композитного электродного материала суперконденсатора из малослойных графитовых фрагментов и $Ni(OH)_2$. **Т. 27, № 3, с. 290–307.**

Афанасьев А. В., Ильин В. А., Лучинин В. В. Ионное легирование карбида кремния в технологии приборов силовой электроники. Обзор. **Т. 27, № 4, с. 439–462.**

Вертянов Д. В., Беляков И. А., Погудкин А. В., Тимошенков С. П., Сидоренко В. Н. Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках. **Т. 27, № 1, с. 28–40.**

Горностай-Польский В. С., Шевяков В. И. Исследование влияния плазменной обработки на свойства сформированных химическим осаждением из газовой фазы тонких пленок нитрида титана. **Т. 27, № 6, с. 715–722.**

Громов Д. Г., Ерицян Г. С., Кицюк Е. П., Савицкий А. И., Скорик С. Н., Дубков С. В., Гринаковский Е. Д., Булярский С. В., Дудин А. А., Волкова Л. С., Еганова Е. М., Трифонов А. Ю., Поляков М. В., Орлов А. П., Рудаков Г. А., Светухин В. В. Формирование планарных автоэмиссионных приборов на основе углеродных нанотрубок на сплаве Co-Nb-N-(O). **Т. 27, № 6, с. 723–739.**

Лучинин В. В., Панов М. Ф., Павлова М. В., Рыбка Ф. Е. Оптический контроль параметров подложек и эпитаксиальных структур карбида кремния. **Т. 27, № 2, с. 175–186.**

Радзиевская Т. А., Иванов Н. Н., Тарасов С. А. Отсекающий УФ-светофильтр для предотвращения отрицательного наклона стенок мастер-штампа мягкой литографии. **Т. 27, № 1, с. 41–49.**

Ромашкин А. В., Поликарпов Ю. А., Левин Д. Д., Неволин В. К. Прозрачный проводящий электрод на основе углеродных нанотрубок, формируемый аэрозольным распылением на полимерном слое P3HT:PCBM. **Т. 27, № 2, с. 159–174.**
Румянцев А. В., Подорожний О. В., Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Моделирование процесса распыления карбида кремния фокусированным пучком ионов галлия. **Т. 27, № 4, с. 463–474.**
Терехов Д. Ю., Пепеляев Д. В., Якубов А. О., Бабич А. В., Шерченков А. А. Разработка процесса фотолитографии для изготовления гибкого тонкопленочного термоэлектрического генератора. **Т. 27, № 5, с. 591–602.**

Элементы интегральной электроники

Гагарина Л. Г., Рубцов Ю. В. Особенности разработки метода классификации плоских QFN-корпусов для применения в составе автоматизированных систем технической подготовки производства изделий микроэлектроники. **Т. 27, № 3, с. 322–332.**
Дворников О. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н., Галкин Я. Д., Кунц А. В., Чумаков В. Е. Радиационно стойкие компоненты полузаказных аналоговых микросхем. **Т. 27, № 3, с. 308–321.**
Залесский В. Б., Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Цымбал В. С. Исследование пропускной способности оптического канала с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя. **Т. 27, № 1, с. 50–58.**
Комаров В. Т. Моделирование СВЧ-усилителей мощности на GaN-транзисторах. **Т. 27, № 2, с. 187–192.**
Полунин М. Н., Лосев В. В., Чаплыгин Ю. А. Исследование методов тестирования SINAD аналого-информационных преобразователей. **Т. 27, № 5, с. 603–612.**
Попов А. В. Расчетная модель оптической системы для одноканального двухспектрального приемника архитектуры электронно-оптического преобразователя. **Т. 27, № 5, с. 613–623.**

Схемотехника и проектирование

Абрамешин Д. А., Пожидаев Е. Д., Саенко В. С., Тумковский С. Р. Моделирование широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости. **Т. 27, № 5, с. 635–644.**
Бибило П. Н., Кириенко Н. А. Схемная реализация модулярных сумматоров в заказных КМОП СБИС и FPGA. **Т. 27, № 4, с. 489–505.**
Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Достижение стабильной выходной мощности и эффективности усилителя мощности класса E при изменении собственной индуктивности частотного фильтра и сопротивления нагрузки. **Т. 27, № 6, с. 753–762.**
Дворников О. В., Павлючик А. А., Прокопенко Н. Н., Чеховский В. А., Кунц А. В., Чумаков В. Е. Унифицированные схемотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем. **Т. 27, № 4, с. 475–488.**
Джанполадов В. А., Гаврилов С. В. Прогнозирование мощности утечки на основе машинного обучения на этапе планировки физического проектирования ИС. **Т. 27, № 6, с. 763–773.**
Ефанов Д. В., Зуева М. В. Коды с суммированием по произвольному модулю в схемах встроенного контроля, реализованных по методу логического дополнения. **Т. 27, № 2, с. 218–232.**
Заплетина М. А. Решение задачи трассировки на ПЛИС с применением модели расширенного смешанного графа коммутационных ресурсов. **Т. 27, № 6, с. 774–786.**
Котляров Е. Ю., Путря М. Г., Михайлов В. Ю., Зубов И. А., Васильев Е. С. Разработка прототипа микросхемы малошумящего усилителя для приемного тракта NB-IoT-системы. **Т. 27, № 6, с. 740–752.**
Матюха В. А., Волощук С. С., Мосин С. Г. Разработка универсального настраиваемого вычислителя целочисленного квадратного корня на базе ПЛИС. **Т. 27, № 2, с. 205–217.**
Синюкин А. С., Ковалев А. В. Методика итерационного уточнения значений параметров в аналитических моделях микроэлектронных устройств. **Т. 27, № 5, с. 645–651.**
Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В., Морозов Н. В., Рождественскене А. В., Степченков Д. Ю. Самосинхронный троичный сумматор с повышенной сбоеустойчивостью. **Т. 27, № 5, с. 624–634.**

Степченков Ю. А., Морозов Н. В., Дьяченко Ю. Г., Хилько Д. В., Степченков Д. Ю., Шикунов Ю. И. Аппаратная реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов в рекуррентном потоковом процессоре на ПЛИС. **Т. 27, № 3, с. 356–366.**
Чердинцев А. А. Прогнозирующая система управления повышающего DC-DC-преобразователя с оптимизацией рабочей частоты. **Т. 27, № 3, с. 344–355.**
Щагин А. В., Нгуен Тхань Зыонг, Чжо Сое Вин. Сравнительный анализ электроприводов производственных станков. **Т. 27, № 2, с. 193–204.**
Щучкин Е. Ю. Методика автоматизированного проектирования DC-DC-преобразователей с учетом паразитных параметров печатной платы. **Т. 27, № 3, с. 333–343.**
Grigoryan M. T. High-speed decision feedback equalizer with low input capacitance dynamic latch comparators
(Григорян М. Т. Высокоскоростной эквалайзер обратной связи с динамическими компараторами, имеющий низкую входную емкость). **Т. 27, № 3, с. 367–373.**
Kostanyan H. T. Skew improvement method for digital delay lines
(***Костанян А. Т.*** Метод выравнивания отклонения сигнала для цифровых линий задержки). **Т. 27, № 2, с. 233–239.**
Melikyan V. Sh., Gumroyan H. V., Shaljyan D. S., Manucharyan D. V. A voltage control system for a low-power devices to address transistor overstress in I2C systems
(Меликян В. Ш., Гумроян Р. В., Шалджян Д. С., Манучарян Д. В. Система управления напряжением для уменьшения перенапряжения транзисторов в маломощных устройствах, подключенных к системе I2C). **Т. 27, № 3, с. 374–381.**

Микро- и наносистемная техника

Архипов А. В., Тимошенков С. П. Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами. **Т. 27, № 5, с. 652–663.**
Браже Р. А. Влияние квантово-размерных эффектов на волновые характеристики наномасштабных линий передачи и резонаторов. **Т. 27, № 4, с. 506–516.**
Йе Ко Ко Аунг, Симонов Б. М., Тимошенков С. П. Анализ усталости и оценка числа циклов воздействия до выхода из строя чувствительного элемента микромеханического емкостного акселерометра. **Т. 27, № 2, с. 240–247.**
Йе Ко Ко Аунг, Симонов Б. М., Тимошенков С. П. Исследование функционирования чувствительного элемента микромеханического акселерометра сэндвич-конструкции емкостного типа в условиях паразитных воздействий по нерабочим осям и случайной вибрации. **Т. 27, № 1, с. 68–79.**
Кочурина Е. С., Анчутин С. А., Калугин В. В., Зарянкин Н. М., Тимошенков А. С., Дернов И. С. Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра. **Т. 27, № 1, с. 59–67.**
Малеванная Е. И., Матанин А. Р., Полозов В. И., Иванов А. И., Самойлов А. А., Бычков С. П., Моисеев К. М., Родионов И. А. Расчет и моделирование систем экранирования для защиты сверхпроводниковой электроники от ИК-излучения. **Т. 27, № 4, с. 517–529.**
Соколов Н. А., Баяндин А. И. Феррозондовые преобразователи слабого магнитного поля на основе стержневых сердечников из аморфных сплавов. **Т. 27, № 1, с. 80–88.**

Интегральные радиоэлектронные устройства

Магеррамов Р. В. Математическое моделирование контура фазовой автоподстройки частоты для реализации АЦП. **Т. 27, № 2, с. 248–258.**
Пантенков Д. Г., Гусаков Н. В., Ломакин А. А. Методический подход к радиоконтролю сигналов спутниковой связи с оценкой требуемых энергетических характеристик приемных станций. **Т. 27, № 3, с. 382–406.**

Биомедицинская электроника

Рубцова Е. Н. Персонализированная математическая модель сердечно-сосудистой системы с механизмом барорефлекса. **Т. 27, № 1, с. 89–105.**

Информационно-коммуникационные технологии

Алимагадов К. А., Умняшкин С. В. Подавление белого шума на изображениях на основе винеровской фильтрации в области дискретного вейвлет-преобразования с применением нейросетевых технологий. **Т. 27, № 6, с. 807–818.**
Буренева О. И., Милакин А. Д., Миронов С. Э. Аппаратная реализация бит-потоковых устройств. **Т. 27, № 5, с. 664–675.**
Гагарина Л. Г., Чирков А. В. Алгоритм обнаружения и распознавания болезней растений с использованием каскадных классификаторов. **Т. 27, № 6, с. 787–794.**
Дорогова Е. Г., Дорогов В. Г., Микитась А. В., Баин А. М., Маршалов В. Н. Моделирование информационных систем с управляемой дисциплиной обслуживания в целях повышения качества обслуживания запросов. **Т. 27, № 2, с. 268–274.**
Егоров Н. И. Разработка высокоскоростного радиочастотного модуля управления беспроводной связью с защитой от дублирования пакетов. **Т. 27, № 4, с. 530–538.**
Жилинский В. О. Алгоритм компенсации остаточной погрешности определения псевдодальности при решении навигационной задачи в абсолютном режиме. **Т. 27, № 4, с. 539–549.**
Кирьянов А. А., Беневоленский С. Б., Сироткин В. Ю. Разработка алгоритма функционирования и особенности обучения когнитивного модуля искусственного интеллекта роботизированной системы тепличного растениеводства. **Т. 27, № 6, с. 795–806.**
Морозов С. А., Мунерман В. И., Симаков В. А. Экспериментальный анализ многомерно-матричного подхода к построению маршрутов в графе. **Т. 27, № 5, с. 676–686.**
Пантенков Д. Г., Гусаков Н. В., Ломакин А. А. Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и космических ретрансляторов. **Т. 27, № 1, с. 120–149**
Парфирьев А. В., Парфирьева О. В., Душкин А. В. Оптимизация алгоритма анализа и обработки информации в оптико-электронной системе. **Т. 27, № 1, с. 106–119.**
Петров Е. Н., Портнов Е. М. Исследование возможностей рекуррентных нейронных сетей для решения задачи классификации слабоструктурированной информации на примере библиографических данных. **Т. 27, № 2, с. 259–267.**
Рябышенков А. С., Волкова Е. А. Кластеризация концентратора данных в составе измерительного поста АСМОС. **Т. 27, № 4, с. 550–558.**
Шевнина Ю. С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных. **Т. 27, № 3, с. 407–415.**

Краткие сообщения

Неустроев С. А. Энергия и амплитуда крутильных колебаний атомов углерода в алмазе. **Т. 27, № 4, с. 559–562.**

Конференции

29-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022». **Т. 27, № 1, 4-я стр. обложки.**
XI Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2022). **Т. 27, № 2, 2-я стр. обложки, Т. 27, № 3, с. 420.**
Российский форум «Микроэлектроника 2022». **Т. 27, № 4, 2-я стр. обложки.**
Харач О. Г., Махиборода М. А. Об итогах 29-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022». **Т. 27, № 3, с. 418–419.**

К 90-летию со дня рождения Вернера Виталия Дмитриевича. **Т. 27, № 1, с. 150.**

Памяти Быкова Дмитрия Васильевича. **Т. 27, № 3, с. 416–417.**

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал **«Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА»** публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- **фундаментальные исследования;**
- **материалы электроники;**
- **технологические процессы и маршруты;**
- **элементы интегральной электроники;**
- **схемотехника и проектирование;**
- **микро- и наносистемная техника;**
- **интегральные радиоэлектронные устройства;**
- **биомедицинская электроника;**
- **информационно-коммуникационные технологии;**
- **проблемы высшего образования.**

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в двух экземплярах***.
2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.
3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).
4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: http://ivuz-e.ru/authors/

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

– на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;

– на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать ***ключевые слова*** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

– печатается ***через два интервала*** с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

– абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только ***по умолчанию.*** Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, PDF, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

– оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

– нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

– русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык.

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

http://ivuz-e.ru