



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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 27

№ 4

июль – август

Vol. 27

No. 4

July – August

2022

Российский форум «Микроэлектроника 2022»

Со 2 по 8 октября 2022 г. на горном курорте «Роза Хутор» (г. Сочи) пройдет основное информационное событие отечественной микро- и радиоэлектронной отрасли – *Российский форум «Микроэлектроника 2022»*. Форум проводится при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

Организаторы: АО «НИИМЭ» и АО «НИИМА «Прогресс».

Генеральные партнеры: Фонд перспективных исследований (ФПИ), компания YADRO.

Инновационный партнер: АО «ОКБ «Астрон».

Партнеры: АО «Микрон», ООО «Аэроб», Группа компаний ШТРИХ-М.

Оператор: ООО «ПрофКонференции».

Генеральный информационный партнер: АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА».

Форум проводится с 2015 г. и охватывает все актуальные отраслевые темы, включая стратегию научно-технологического развития электронной промышленности, создание и применение электронной компонентной базы (ЭКБ), реализацию стратегических научно-технических, промышленных и инновационных проектов в сфере микро- и радиоэлектроники, нормативно-правовую базу и стандартизацию, преодоление импортозависимости и создание цифровой экономики.

В рамках Форума состоятся мероприятия, направленные на содействие росту радиоэлектронной отрасли России:

- **Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули»:**
 - пленарное заседание по перспективам развития радиоэлектронного комплекса, отечественных электронных компонентов и систем на их основе,
 - трек обзорно-дискуссионных заседаний по наиболее актуальным вопросам разработки, производства и применения ЭКБ в современных условиях,
 - 13 научно-технических секций по тематическим направлениям с участием специалистов ведущих российских научно-исследовательских институтов, университетов, производственных предприятий, дизайн-центров, в том числе две новые секции: «Технологии оптоэлектроники и фотоники» и «Материалы микро- и наноэлектроники»,
 - две предконференции, которые пройдут в Москве в сентябре 2022 г. на базе НИЯУ МИФИ и НИУ МИЭТ и в рамках которых будут представлены доклады на темы, связанные с созданием доверенных и экстремальных электронных систем, информационно-управляющих радиотехнических систем, ЭКБ, специального технологического оборудования, материалов, а также других актуальных направлений развития научно-технического потенциала отрасли;
- **Деловая программа** – обсуждение в рамках круглых столов и панельных дискуссий актуальных вопросов развития микро- и радиоэлектроники с участием регуляторов отрасли, представителей бизнеса, промышленности, науки и профессионального образования;
- **Демонстрационная зона** – представление участниками своих продуктов и решений в рамках единого выставочного пространства;
- **Школа молодых ученых** – коммуникационная среда для привлечения и выявления наиболее перспективных и талантливых ученых среди учащихся российских вузов и молодых специалистов.

Актуальную информацию можно получить на официальном сайте Форума:
microelectronica.pro





Известия высших учебных заведений.
ЭЛЕКТРОНИКА

Том 27, № 4, 2022

июль – август

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

Газарина 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

Горбачевич 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

Коноплев 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)

Лабунюв Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881

Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синописис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860

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

Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0002-5834-5138

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

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

Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977

Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф.,
НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254

Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0002-5589-7068

Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186

Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф.,
Институт электронной инженерии и нанотехнологий АНМ (Кишинев, Молдова),
ORCID: 0000-0001-7433-4140

Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X

Тимошенко Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0001-5411-1804

Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

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. Проскуракова*

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 11.08.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.

Объем 16,74 усл.печ.л., 14,948 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 6. 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:

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.27.00 Электроника

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.

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

- 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 427

Технологические процессы и маршруты

- Афанасьев А. В., Ильин В. А., Лучинин В. В.* Ионное легирование карбида кремния в технологии приборов силовой электроники. Обзор 439
- Румянцев А. В., Подорожний О. В., Волков Р. Л., Боргардт Н. И.* Моделирование процесса распыления карбида кремния фокусированным пучком ионов галлия 463

Схемотехника и проектирование

- 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 475
- Бибило П. Н., Кириенко Н. А.* Схемная реализация модулярных сумматоров в заказных КМОП СБИС и FPGA 489

Микро- и наносистемная техника

- Браже Р. А.* Влияние квантово-размерных эффектов на волновые характеристики наномасштабных линий передачи и резонаторов 506
- 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 517

Информационно-коммуникационные технологии

- Егоров Н. И.* Разработка высокоскоростного радиочастотного модуля управления беспроводной связью с защитой от дублирования пакетов 530
- Жилинский В. О.* Алгоритм компенсации остаточной погрешности определения псевдодалности при решении навигационной задачи в абсолютном режиме 539
- Рябышенков А. С., Волкова Е. А.* Кластеризация концентратора данных в составе измерительного поста АСМОС 550

Краткие сообщения

- Неустров С. А.* Энергия и амплитуда крутильных колебаний атомов углерода в алмазе 559

Конференции

- Российский форум «Микроэлектроника 2022» 2-я стр. обложки
- К сведению авторов 563



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 27, No. 4, 2022
July – August

The scientific and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X

Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878

Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136

Vladimir A. Bespalov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-8015-7603

Alexandr V. Dushkin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-8078-8971

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7591-9175

Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471

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

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

Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

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

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. Petrosyantz – 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 Microe-
lectronics 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., Institute of the
Electronic Engineering and Nanotechnologies ASM (Chisinau, Moldova),
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 11.08.2022. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed
sheets 16,74. Number of copies 130. Order no. 6. 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:

05.11.00 Instrumentation, metrology and information-measuring devices and systems

05.13.00 Computer science, computer engineering and management

05.27.00 Electronics

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.

CONTENTS

Electronics materials

- Tikhonov R. D., Polomoshnov S. A., Amelichev V. V., Cheremisinov A. A., Potapov V. S., Gorelov D. V., Kasakov Ju. V.* Mechanical stresses and magnetic properties of NiFe and CoNiFe films obtained by electrochemical deposition 427

Technological processes and routes

- Afanasev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V.* Ion doping of silicon carbide in the technology of power electronics devices. Review 439
- Rumyantsev A. V., Podorozhniy O. V., Volkov R. L., Borgardt N. I.* Simulation of silicon carbide sputtering by gallium focused ion beam 463

Circuit engineering and design

- Dvornikov O. V., Pavlyuchik A. A., Prokopenko N. N., Tchekhovski V. A., Kunts A. V., Chumakov V. E.* Unified circuitry solutions for analog gallium-arsenide microcircuits 475
- Bibilo P. N., Kirienko N. A.* Circuit implementation of modular adders in custom CMOS VLSI and FPGA 489

Micro- and nanosystem technology

- Brazhe R. A.* The influence of quantum-dimensional effects on the wave characteristics of nanoscale transmission lines and resonators 506
- Malevannaya E. I., Matanin A. R., Polozov V. I., Ivanov A. I., Samoylov A. A., Bychkov S. P., Moiseev K. M., Rodionov I. A.* Calculation and simulation of shielding systems for the protection of superconducting electronic circuits from IR radiation 517

Information-communication technologies

- Egorov N. I.* Development of high-speed radiofrequency wireless control module with anti-replay protection 530
- Zhilinskiy V. O.* Residual pseudorange error compensation algorithm for code-based positioning service in absolute mode 539
- Riabyshenkov A. S., Volkova E. A.* Clustering of the data concentrator as part of the ASMOS measuring post 550

Brief reports

- Neoustroev S. A.* Carbon atoms' torsional vibrations energy and amplitude in diamond 559

Conferences

- Russian Forum "Microelectronics 2022" 2nd cover page
- Instructions for authors 563

Научная статья
УДК 621.3.049.77.002
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-427-438

**Механические напряжения
и магнитные свойства пленок NiFe и CoNiFe,
полученных электрохимическим осаждением**

*Р. Д. Тихонов, С. А. Поломошнов, В. В. Амеличев, А. А. Черемисинов,
В. С. Потапов, Д. В. Горелов, Ю. В. Казаков*

НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

R.Tikhonov@tcen.ru

Аннотация. Магнитные пленки пермаллоя NiFe и тройного сплава CoNiFe применяются в изделиях нано- и микроэлектроники, а также в магнитной памяти с высокой плотностью упаковки. Электрохимическое покрытие NiFe и CoNiFe снижает коррозию и износ в магнитных и электрических устройствах, а также используется для электрокаталитических материалов. Большие механические напряжения в магнитных пленках приводят к деформациям и неисправностям приборов из-за отслоения пленок от подложки кремния. В работе для выяснения природы явлений, происходящих при электрохимическом осаждении пленок NiFe и CoNiFe разной толщины и приводящих к механическим напряжениям, проведено исследование их параметров. Показано, что измерение прогиба пластин, состоящих из Si, SiO₂, Si₃N₄, NiCr, Ni, после нанесения на них каждого из слоев NiFe и CoNiFe позволяет определить механические напряжения в пленках. Установлено, что прогиб пластин с нанесенными пленками Si₃N₄ отрицательный и больше, чем с пленками SiO₂. Прогиб после нанесения слоев NiCr и Ni отрицательный. Прогиб пластин кремния с нанесенными пленками CoNiFe имеет максимальное значение 180 мкм при толщине пленки 12 мкм, с пленками NiFe – 150 мкм при толщине пленки 15 мкм. Прогиб после нанесения пленок NiFe, CoNiFe положительный. Отслаивания пленок не наблюдается. Разница знаков деформации пленок Ni и CoNiFe или NiFe и прямой зависимости прогиба пластин кремния от толщины пленок NiFe и CoNiFe позволяет связать механические напряжения с наводороживанием (водородной хрупкостью) и выделением водорода после процесса. Определено, что намагниченность пленок NiFe ниже, чем пленок CoNiFe. Последние перспективны для применения в преобразователях магнитного поля.

Ключевые слова: пленки CoNiFe, NiFe, хлоридный электролит, электрохимическое осаждение, сахарин, механическое напряжение в пленке, намагничивание пленок

© Р. Д. Тихонов, С. А. Поломошнов, В. В. Амеличев, А. А. Черемисинов, В. С. Потапов, Д. В. Горелов, Ю. В. Казаков, 2022

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр» (г. Москва).

Для цитирования: Механические напряжения и магнитные свойства пленок NiFe и CoNiFe, полученных электрохимическим осаждением / Р. Д. Тихонов, С. А. Поломошнов, В. В. Амеличев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 427–438. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-427-438>

Original article

Mechanical stresses and magnetic properties of NiFe and CoNiFe films obtained by electrochemical deposition

R. D. Tikhonov, S. A. Polomoshnov, V. V. Amelichev, A. A. Cheremisinov, V. S. Potapov, D. V. Gorelov, Ju. V. Kasakov

SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia

R.Tikhonov@tcen.ru

Abstract. Magnetic films of NiFe permalloy and CoNiFe ternary alloy have application in nano- and microelectronics products and in tightly-packed magnetic memory. The NiFe and CoNiFe coatings decrease corrosion and depletion in electrical devices; they are also used in electrocatalytic materials. Large stresses in magnetic films lead to deformation and instrument faults caused by film peeling off silicon substrate. In this work, to clarify the nature of the phenomena occurring during the electrochemical deposition of NiFe, CoNiFe films and leading to mechanical stresses, their study was carried out. It was demonstrated that a measurement of deflection of silicon substrates on an optical profilometer in the structure of Si, SiO₂, Si₃N₄, NiCr, Ni, after applying each of the CoNiFe or NiFe layers to the silicon substrate, allows the determination of mechanical stresses in films. It has been established that the deflection of the plates with Si₃N₄ is negative and greater than with SiO₂. Deflection after applying NiCr and Ni layers is negative. Deflection of silicon wafers with ternary alloy CoNiFe films has a maximum value of 180 μm with a film thickness of 12 μm, and with permalloy NiFe films, a maximum value of 150 μm with a film thickness of 15 μm. Deflection after application of NiFe, CoNiFe is positive. Peeling of films is not observed. Difference in the deformation signs of Ni and CoNiFe or NiFe films and in the direct dependence of the silicon deflection on the thickness of NiFe and CoNiFe films makes it possible to bind mechanical stresses with hydrogenation and hydrogen release after the process. It has been determined that the magnetic susceptibility of NiFe permalloy films is lower than the triple CoNiFe system. The latter are promising for use in magnetic field converters.

Keywords: CoNiFe, NiFe films, chloride electrolyte, electrochemical deposition, saccharin, mechanical stress in film, films magnetization

Acknowledgments: the work has been carried out using equipment of the Centre for collective use “Functional control and diagnostics of micro- and nanosystem technology” on the basis of the SMC “Technological Centre” (Moscow).

For citation: Tikhonov R. D., Polomoshnov S. A., Amelichev V. V., Cheremisinov A. A., Potapov V. S., Gorelov D. V., Kasakov Ju.V. Mechanical stresses and magnetic properties of NiFe and CoNiFe films obtained by electrochemical deposition. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 427–438. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-427-438>

Введение. Магнитные пленки пермаллоя NiFe и тройного сплава CoNiFe перспективны для использования, например, в качестве головок чтения или записи информации, магнитосенсоров и магнитных устройств хранения данных. Большие механические напряжения в магнитных пленках приводят к деформации или неисправностям приборов из-за отслоения пленок от подложки кремния. Механические напряжения в пленках NiFe и CoNiFe исследованы в работах [1–4].

В работе [1] изучены пленки CoNiFe, полученные электрохимическим осаждением с добавлением сахарина $C_7H_4NaNO_3S \cdot 2H_2O$ и лаурилсульфата натрия. Изменений объемных свойств при разной толщине пленок и различных материалах подложки не обнаружено, однако при этом меняются механические напряжения. В работе [2] тонкие пленки $Fe_{70}Co_{29}Ni_1$ с большим значением насыщения магнитной индукции, равным 2,2 Тл, при значении коэрцитивной силы 60 Э и малых механических напряжениях получены электрохимическим осаждением из хлоридного электролита с содержанием, моль/л: $FeCl_2 \cdot 6H_2O - 1,275$; $CoCl_2 \cdot 6H_2O - 0,225$; $NiCl_2 \cdot 6H_2O - 0,02$; $CaCl_2 - 1,0$; аскорбиновой кислоты – 0...0,05. При этом $T = 23...90$ °С, $pH = 0,34...5$, плотность тока $J = 5$ мА/см². Установлено, что механические напряжения в пленке уменьшаются при повышении температуры электролита и возрастают при увеличении содержания Ni. Механические напряжения обратно пропорциональны размеру зерна. Аскорбиновая кислота в электролите стабилизирует раствор и позволяет работать при $pH = 2$, что снижает механические напряжения и предотвращает образование осадка. Осаждение пленок тройного сплава Ni-Co-Fe проведено в работе [3] из сульфатного электролита с добавками сахарина разной концентрации. Наименьшие значения механических напряжений (61 МПа) получены при концентрации сахарина 0,004 моль/л (0,9 г/л). При повышении температуры электролита с 25 до 50 °С механические напряжения уменьшились до 32 МПа.

Внутренние напряжения и магнитные свойства тонких пленок Ni-Fe изучены в работе [4] при электроосаждении в кислых хлоридных условиях. Содержание Fe зависит от температуры раствора. Напряжение пленок уменьшается при повышении температуры раствора. Размер зерна пленки обратно пропорционален ее напряжению. Внутреннее напряжение пленки и магнитные свойства взаимосвязаны. В работе [5] проанализированы влияние и механизм действия сахарината натрия на снижение внутреннего напряжения магнитных пленок Fe-Ni. Также исследовано влияние pH, температуры и концентрации сахарина натрия на процесс осаждения пленок Fe-Ni. Поляризационная кривая процесса осаждения пленок Fe-Ni измерена с помощью многофункциональной электрохимической рабочей станции, морфология и кристаллическая структура – с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгеновской дифракции. Установлено, что ион Fe^{2+} и аминогруппа сахарина натрия образуют комплекс с положительным зарядом на поверхности электрода, который предотвращает приближение ионов водорода к катоду и увеличивает энергию активации разряда иона водорода. В результате уменьшаются эволюция водорода и внутреннее напряжение покрытия.

В работе [6] изучено влияние вакуумной термообработки пленок металлов на поверхности кремниевых подложек на их морфологию, взаимодействие с подложкой, динамику макронапряжений в системе пленка – подложка и возможность дефектообразо-

вания. Экспериментальные исследования выполнены для пленок V, Cr, Ta, Ni и Ti. Определены закономерности влияния режимов термообработки на характеристики получаемых пленок. Показано, что наиболее перспективным для формирования термостойкой металлизации ИС являются пленки Ta, так как в них отсутствуют большие напряжения до температуры 850 °С и они нейтральны по отношению к кремниевой подложке. Напряжения в пленке металла, нанесенной на кремниевую подложку размером $3 \times 30 \times 0,075$ мм, в [6] оцениваются по формуле $\sigma = Ed^2/6rt$, где E – модуль Юнга; d – толщина подложки; t – толщина пленки; r – радиус кривизны образца.

В рассмотренных работах изучено влияние различных факторов на механические напряжения в пленках магнитных сплавов NiFe, CoNiFe и других металлов, но не показана природа их возникновения. Цель настоящей работы – исследование механических напряжений и магнитных свойств пленок NiFe и CoNiFe разной толщины, полученных электрохимическим осаждением.

Электрохимическое осаждение пленок NiFe и CoNiFe при разной концентрации электролита. Проведены эксперименты по электрохимическому осаждению пленок пермаллоя NiFe и тройного сплава CoNiFe из хлоридного электролита с мольным соотношением 1:1:1 и содержанием солей, моль/л: $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,48; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,083; $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 0,006. В результате обнаружена зависимость состава пленок от концентрации солей в электролите.

В работах [7, 8] показано, что состав пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора, содержащего FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждой из солей, равной 0,006 моль/л, близок к составу электролита. В растворе FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждой из солей, равной 0,48 или 0,083 моль/л, содержание металлов отличается от состава электролита и сильно изменяется в зависимости от плотности тока, что не позволяет подобрать плотность тока для получения состава пленки, равного составу электролита. При электрохимическом осаждении из электролита, составленного из FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с одинаковым содержанием каждой из солей, равным 0,00625 моль/л, происходит отслаивание пленок NiFe и CoNiFe толщиной менее 1 мкм. Добавка 0,3 мл/л 30%-ной соляной кислоты в электролит обеспечивает электрохимическое осаждение пленок NiFe и CoNiFe толщиной 3–4 мкм при температуре 70 °С. Повторное осаждение в тех же режимах по току из тех же электролитов, но с добавками сахара и борной кислоты обеспечивает получение более толстых пленок без отслаивания. Однако при этом происходит прогиб кремниевых пластин из-за механических напряжений в пленках.

Измерение механических напряжений пленок NiFe и CoNiFe. Измерение прогиба D пластин кремния на оптическом профилометре FRT MicroProb 100 в структуре, показанной на рис. 1, позволяет определить механические напряжения в пленках NiFe и CoNiFe.

На 25 пластинах кремния КЭФ-4,5 (100) диаметром 100 мм с двухсторонней полировкой и окислом толщиной 0,65 мкм формировали структуры для исследования. На пластины 1–12 наносили нитрид кремния Si_3N_4 толщиной 0,17 мкм. На все пластины напыляли слои Cr толщиной 0,05 мкм и Ni толщиной 0,2 мкм. На пластины 1–6, 13–18 электрохимическим способом осаждали пленки $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, на пластины 7–12, 19–24 – CoNiFe из электролита с концентрацией 0,08 моль/л. Технология осаждения пленок NiFe и CoNiFe описана в работах [7–9]. Содержание сахара в электролитах для NiFe и CoNiFe составляет 3 г/л (0,013 моль/л).

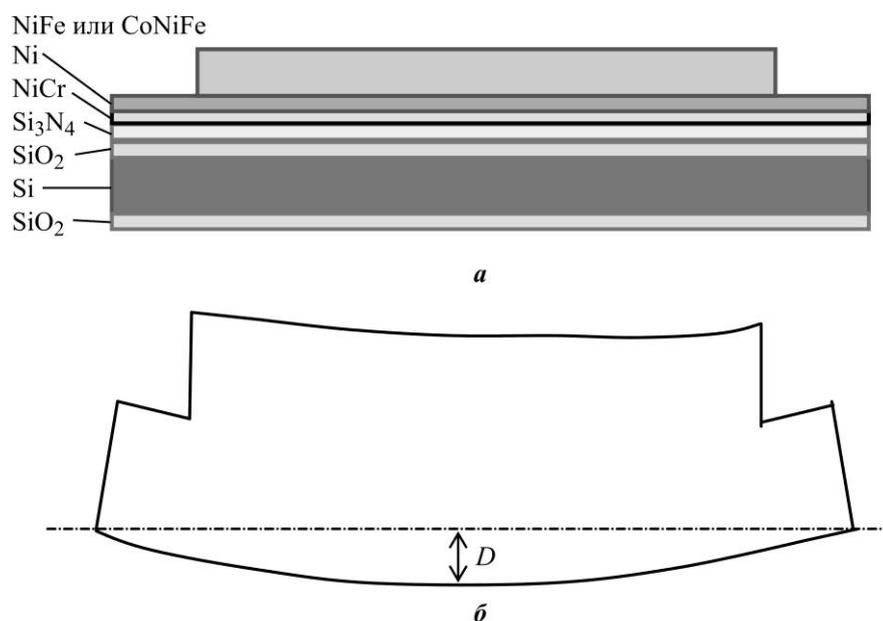


Рис. 1. Структура исследованных образцов (а) и схема прогиба D (б)
 Fig. 1. Structure of the examined samples (a) and deflection D (b)

На пластинах кремния после его окисления измеряли прогиб D_1 , после осаждения Si_3N_4 – прогиб D_2 , после напыления подслоя NiCr – прогиб D_3 , после электрохимического осаждения пленок NiFe и CoNiFe – прогиб D_4 и толщину пленок H на анализаторе микросистем MSA-500 (Micro System Analyzer) на границе пленки и маскирующего элемента фоторезиста. Прогиб пластин анализировали на обратной стороне пластины. Результаты измерений геометрических параметров пластин представлены на рис. 2 и 3.

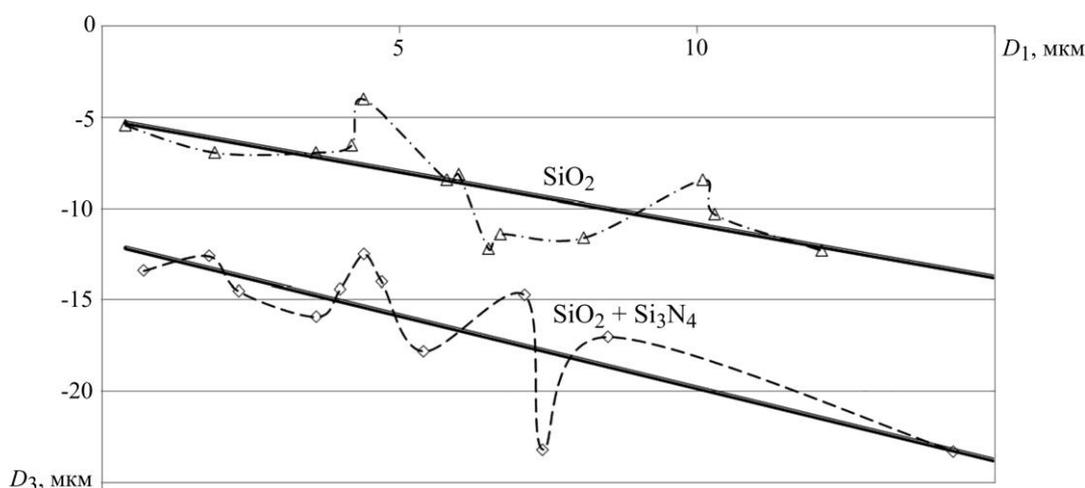


Рис. 2. Корреляция между прогибом D_1 кремниевых пластин с двухсторонней полировкой с окислом SiO_2 и нанесенной пленкой Si_3N_4 и прогибом D_3 после напыления пленок NiCr и Ni

Fig. 2. Correlation of the D_1 deflection of silicon wafers with double-sided polishing with SiO_2 oxide and with the applied Si_3N_4 film with the deflection of D_3 wafers after spraying NiCr and Ni films

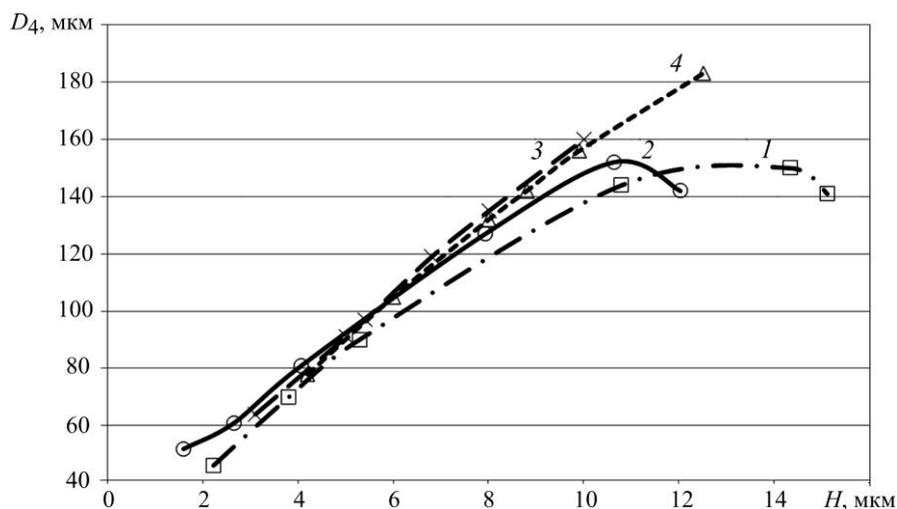


Рис. 3. Зависимость прогиба D_4 кремниевых пластин с двухсторонней полировкой от толщины H пленок: пленки NiFe, нанесенные на слой Ni с подслоем SiO_2 (кривая 1) и подслоем $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ (кривая 2); пленки CoNiFe, нанесенные на слой Ni с подслоем SiO_2 (кривая 3) и подслоем $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ (кривая 4)

Fig. 3. Dependence of D_4 deflection of silicon wafers with double-sided polishing on the thickness H of the films: NiFe films deposited on Ni layer with SiO_2 sublayer (curve 1) and with sublayer $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ (curve 2); CoNiFe films deposited on Ni layer with SiO_2 sublayer (curve 3) and with sublayer $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ (curve 4)

Края подложки опускаются на лицевой стороне ниже центра. Корреляция между прогибом D_1 окисленных кремниевых пластин с двухсторонней полировкой и дополнительным слоем Si_3N_4 толщиной 0,17 мкм, осажденным при температуре 700 °С, и прогибом D_3 после нанесения слоев NiCr и Ni толщиной 0,2 мкм при температуре 200 °С составляет от –5 до –24 мкм (см. рис. 2). Прогиб пластин после нанесения слоев NiCr и Ni отрицательный, прогиб пластин после нанесения слоя Si_3N_4 также отрицательный и больше на 8 мкм, чем после нанесения слоя с SiO_2 . На рис. 3 представлена зависимость прогиба D_4 кремниевых пластин с двухсторонней полировкой от толщины H пленок NiFe и CoNiFe, полученных электрохимическим осаждением. Как видно из рисунка, прогиб пластин кремния с нанесенными пленками CoNiFe имеет максимальное значение, равное 180 мкм, при толщине пленки 12 мкм и минимальное значение, равное 60 мкм, при толщине пленки 3 мкм. Прогиб пластин кремния с нанесенными пленками NiFe имеет максимальное значение, равное 150 мкм, при толщине пленки 15 мкм и минимальное значение, равное 45 мкм, при толщине пленки 2 мкм. Края подложки поднимаются на лицевой стороне выше центра. При малой толщине пленок прогиб определяется только толщиной пленок NiFe и CoNiFe. При большой толщине пленок наблюдается разное изменение прогиба: для пленок NiFe толщиной более 10 мкм прогиб ограничен значением 150 мкм, для пленок CoNiFe прогиб определяется только толщиной пленок. Отслаивания пленок не наблюдается.

Согласно формуле Стоуни [10], преобразованной применительно к значениям измеряемого сферического прогиба круглой пластины кремния равномерной толщины с магнитными пленками на плоской поверхности, прогиб подложки пропорционален механическому напряжению в пленке:

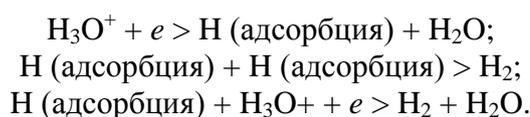
$$\sigma = D_{\text{Si}} M_{\text{Si}} h_{\text{Si}}^2 / (3Hr_{\text{Si}}^2),$$

где D_{Si} – прогиб кремниевой пластины; $M_{Si} = 1,09 \cdot 10^{11}$ Па – модуль Юнга монокристаллического кремния [11, с. 34]; $h_{Si} = 450$ мкм – толщина кремниевой пластины; H – толщина магнитной пленки; $r_{Si} = 50$ мм – радиус кремниевой пластины.

При толщине пленки 12 мкм и прогибе 180 мкм механическое напряжение в пленке CoNiFe составляет 17,7 МПа. Это значение согласуется по порядку величины со значениями механических напряжений 32–270 МПа, полученными с помощью анализатора механических напряжений в работе [2]. Прогиб кремниевых пластин после нанесения слоев NiCr и Ni, так же как и прогиб пластин после нанесения Si_3N_4 , отрицательный. Прогиб пластин после нанесения NiFe и CoNiFe имеет положительную величину, т. е. пленки сжимаются после нанесения. Таким образом, происходит компенсация прогиба пластин кремния. Различие знаков прогиба пластин при нанесении слоев Ni при повышенной температуре, а также пленок NiFe и CoNiFe при температуре, близкой к комнатной, свидетельствует о том, что деформация происходит за счет разности коэффициентов термического расширения для Ni и Si, а для магнитных пленок NiFe и CoNiFe – из-за специфики процесса электрохимического осаждения.

При электрохимическом осаждении магнитомягких материалов широко применяются органические добавки, которые снижают механические напряжения пленок [12]. Установлено, что при введении сахара до 4 г/л (0,018 моль/л) в электролиты для осаждения сплавов Ni-Fe наблюдается падение коэрцитивной силы H_c с 400 до 80 А/м (5 до 1 Э), что объясняется уменьшением размера кристаллитов и шероховатости осадка и снижением количества водорода в осадке. Причина механических напряжений в пленках, которые при электрохимическом осаждении наносили при температуре, близкой к комнатной, не рассматривается, хотя корреляция двух параметров наводороживания (водородной хрупкости) железосодержащих сплавов и механических напряжений в пленках очевидна.

Диффузия водорода в железо подробно исследована в [13]. Установлено, что диффузия ускоряется при катодной поляризации. Суммарная реакция выделения водорода включает в себя такие стадии, как разряд и адсорбция; рекомбинация и электрохимическая десорбция [12]:



Исследования показали, что водород растворяется в окто- и тетрапорах кристаллической решетки металлов в ионизированном состоянии, скапливается в порах и других дефектах кристаллической решетки в молекулярной форме, вступает в химическое взаимодействие с различными элементами и фазами в металлах и сплавах, а также адсорбируется внутри металла на поверхностях микрополостей, пор, микротрещин, сегрегирует на дефектах кристаллической решетки и границах кристаллитов. После завершения электрохимических процессов водород выделяется из пленок, что приводит к возникновению механических напряжений сжатия в осажденной пленке.

В проводимых авторами настоящей статьи экспериментах при осаждении пленок NiFe и CoNiFe в течение нескольких минут наблюдали голубое свечение поверхности пленок после извлечения из электролита, которое связано с выделением водорода. Если в электролит не введены добавки сахара, даже относительно тонкие пленки NiFe и CoNiFe толщиной 3–4 мкм отслаиваются вместе с подслоем Ni, NiCr от подложки. Во всех реакциях в электролите присутствует водород, который в виде положительных ионов притягивается к катоду и уменьшает катодный выход металлов и при этом вхо-

дит в структуру пленки. Выделение водорода с поверхности создает механические напряжения в электрохимически осажденных пленках NiFe и CoNiFe. Действие сахара связано с уменьшением наводороживания за счет образования на поверхности металла катода адсорбционного монослоя, который препятствует разряду ионов H^+ . Считается, что органические соединения при химической адсорбции образуют ориентированный слой, препятствующий прохождению ионов водорода к электроду [14].

Исследование магнитных свойств пленок NiFe и CoNiFe. Магнитные свойства (намагниченность) и коэрцитивную силу пленок NiFe (пластины 1–6, 13–18, 25) и CoNiFe (пластины 7–12, 19–24) исследовали по петле гистерезиса потока магнитного поля на анализаторе магнитных свойств пленок. Состав пленок на пластинах определяли с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора. Результаты измерений магнитных параметров (удельной намагниченности B/h и коэрцитивной силы H_c), а также состав пленок NiFe (пластины 1–6, 13–18) и CoNiFe (пластины 7–12, 19–24) представлены на рис. 4.

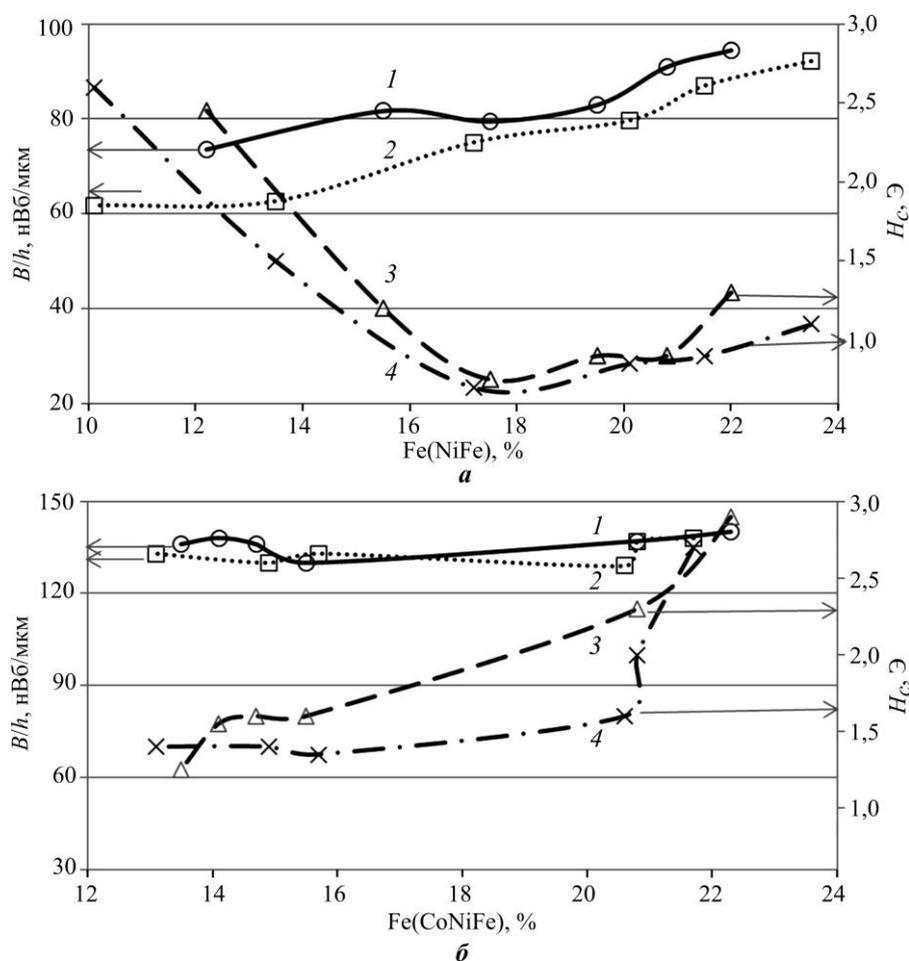


Рис. 4. Зависимости магнитных свойств намагничивания B/h и коэрцитивной силы H_c пленок NiFe (а) и CoNiFe (б) от содержания Fe: 1, 3 – пленки с подслоем $SiO_2 + Si_3N_4$; 2, 4 – пленки с подслоем SiO_2

Fig. 4. Dependences of the magnetic magnetization properties of B/h and the coercive force of H_c NiFe (a) and CoNiFe (b) films on the content of Fe: 1, 3 – films with sublayer $SiO_2 + Si_3N_4$; 2, 4 – films with sublayer SiO_2

Намагниченность пленок NiFe при нанесении на подслоя SiO₂ + Si₃N₄ увеличивается с 73 до 95 нВб/мкм при увеличении содержания Fe с 12 до 22 %. Коэрцитивная сила H_c пленок NiFe имеет минимальное значение 0,7 Э при содержании Fe в диапазоне 16–21 % для обоих видов подслоя. Намагниченность пленок CoNiFe не зависит от наличия подслоев SiO₂ или SiO₂+Si₃N₄ и равна 130 нВб/мкм, что больше, чем намагниченность пленок NiFe (85 нВб/мкм) при содержании Fe в диапазоне 13–23 %. Коэрцитивная сила H_c пленок CoNiFe имеет минимальное значение 1,25 Э при содержании Fe в диапазоне 13–21 % для обоих видов подслоя.

Осаждение пленок CoNiFe из сульфат-хлоридного электролита [15] показало, что Co и Fe осаждаются с концентрацией, в три раза большей, чем в электролите, а никель – в два раза меньшей. Аномальность зависимости состава пленок от состава электролита не позволяет получать соответствие этих параметров. Таким образом, магнитные свойства пленок зависят от состава пленок. Аномальность осаждения затрудняет оптимизацию магнитных свойств пленок CoNiFe.

Заключение. Исследования толстых пленок NiFe и CoNiFe с большими значениями магнитной проницаемости и малыми механическими напряжениями, полученных электрохимическим осаждением из хлоридного электролита, показали следующее.

Температура осаждения, равная 70 °С, уменьшает механические напряжения в пленках, которые связаны с наводороживанием. Частичная компенсация механических напряжений пленок NiFe и CoNiFe может происходить за счет другого знака механических напряжений в пленках подслоя Ni. Уменьшение наводороживания достигается применением сахарина. Добавка соляной кислоты стабилизирует раствор и позволяет работать в широком диапазоне pH при сохранении низкого механического напряжения осажденных пленок и предотвращает образование осадка в электролите.

В результате измерения магнитных параметров получено, что намагниченность пленок NiFe ниже, чем пленок CoNiFe. Последние могут применяться в преобразователях магнитного поля.

Литература

1. *Tobakovic I., Inturi V., Riemer S.* Composition, structure, stress, and coercivity of electrodeposited soft magnetic CoNiFe films // Journal of the Electrochemical Society. 2002. Vol. 149 (1). P. C18–C22. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1421346>
2. *Park D.-Y., Yoo B. Y., Kelcher S., Myung N. V.* Electrodeposition of low-stress high magnetic moment Fe-rich FeCoNi thin films // Electrochimica Acta. 2006. Vol. 51. Iss. 12. P. 2523–2530. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.07.037>
3. The deposit stress behavior and magnetic properties of electrodeposited Ni-Co-Fe ternary alloy films / *J.-S. Kim, J.-H. Kwak, S.-H. Na et al.* // Journal of the Korean Physical Society. 2012. Vol. 61 (4). P. 609–612. doi: <https://doi.org/10.3938/jkps.61.609>
4. *Koo B.-K.* Effect of bath conditions and current density on stress and magnetic properties of Ni-Fe nano thin films synthesized by electrodeposition methods // Journal of the Korean Institute of Surface Engineering. 2011. Vol. 44. Iss. 4. P. 137–143. doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2011.44.4.137>
5. *Wu Y., Ji B., Wang W.* Reducing the internal stress of Fe-Ni magnetic film using the electrochemical method // Processes. 2021. Vol. 9. Iss. 11. Art. No. 1883. doi: <https://doi.org/10.3390/pr9111883>
6. Динамика напряжений в пленках металлов на кремнии при вакуумной термообработке / *В. Н. Джунлин, В. С. Климин, Ю. В. Морозова и др.* // Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 6. С. 453–460. doi: <https://doi.org/10.31857/S0544126921060053>
7. *Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А., Горелов Д. В., Казаков Ю. В.* Магнитные свойства пленок Co-Ni-Fe, полученных электрохимическим осаждением по методу Тихонова // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22. № 3. С. 123–135. doi: <https://doi.org/10.17587/nmst.22.123-135>

8. Формирование пленок тройной системы CoNiFe электрохимическим осаждением / *Р. Д. Тихонов, С. А. Поломошнов, В. В. Амеличев и др.* // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 246–254. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-246-254>

9. *Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А., Тихонов М. Р.* Ионный разряд при электрохимическом осаждении пленок CoNiFe // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 12. С. 756–761. doi: <https://doi.org/10.31857/S0424857021120070>

10. *Chason E.* Measurement of stress evolution in thin films using real-time *in situ* wafer curvature (k-Space MOS) // k-Space [Электронный ресурс]. URL: <https://www.k-space.com/wp-content/uploads/MOSforThinFilms.pdf> (дата обращения: 16.05.2022).

11. *Анурьев В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / под ред. И. Н. Жестковой. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. Т. 1. 920 с.

12. *Вячеславов П. М.* Электролитическое осаждение сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1977. 94 с.

13. *Белоглазов С. М.* Электрохимический водород и металлы: поведение, борьба с охрупчиванием. Калининград: Изд-во Калинингр. гос. ун-та, 2004. 320 с.

14. *Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А.* Электрохимия: учеб. пособие. 3-е изд., испр. СПб.: Лань, 2015. 672 с.

15. *Yang Y.* Preparation of Fe-Co-Ni ternary alloys with electrodeposition // Int. J. Electrochem. Sci. 2015. Vol. 10. Iss. 6. P. 5164–5175.

Статья поступила в редакцию 26.11.2021 г.; одобрена после рецензирования 23.03.2022 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторах

Тихонов Роберт Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории новых технологических процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), R.Tikhonov@tcen.ru

Поломошнов Сергей Александрович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории новых технологических процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), PSA@tcen.ru

Амеличев Владимир Викторович – кандидат технических наук, начальник отдела микросистемной техники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), AVV@tcen.ru

Черемисинов Андрей Андреевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории микроэлектроники и микросенсорики НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), CheremisinovAA@gmail.com

Потапов Вадим Сергеевич – начальник химической лаборатории НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), V.Potapov@tcen.ru

Горелов Дмитрий Викторович – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории новых микроэлектромеханических систем НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gorelovdmittii@gmail.com

Казаков Юрий Владимирович – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории магнитополупроводниковых нано- и микросистем НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), madvc@gmail.com

References

1. Tobakovic I., Inturi V., Riemer S. Composition, structure, stress, and coercivity of electrodeposited soft magnetic CoNiFe films. *Journal of the Electrochemical Society*, 2002, vol. 149 (1), pp. C18–C22. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1421346>
2. Park D.-Y., Yoo B. Y., Kelcher S., Myung N. V. Electrodeposition of low-stress high magnetic moment Fe-rich FeCoNi thin films. *Electrochimica Acta*, 2006, vol. 51, iss. 12, pp. 2523–2530. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.07.037>
3. Kim J.-S., Kwak J.-H., Na S.-H., Lim S.-K., Suh S.-J. The deposit stress behavior and magnetic properties of electrodeposited Ni-Co-Fe ternary alloy films. *Journal of the Korean Physical Society*, 2012, vol. 61 (4), pp. 609–612. doi: <https://doi.org/10.3938/jkps.61.609>
4. Koo B.-K. Effect of bath conditions and current density on stress and magnetic properties of Ni-Fe nano thin films synthesized by electrodeposition methods. *Journal of the Korean Institute of Surface Engineering*, 2011, vol. 44, iss. 4, pp. 137–143. doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2011.44.4.137>
5. Wu Y., Ji B., Wang W. Reducing the internal stress of Fe-Ni magnetic film using the electrochemical method. *Processes*, 2021, vol. 9, iss. 11, art. no. 1883. doi: <https://doi.org/10.3390/pr9111883>
6. Dzhuplin V. N., Klimin V. S., Morozova Yu. V., Rezvan A. A., Vakulov Z. E., Ageev O. A. Dynamics of stress in films of metals on silicon during vacuum heat treatment. *Russian Microelectronics*, 2021, vol. 50, pp. 412–419. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063739721060056>
7. Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A., Gorelov D. V., Kasakov Iu. V. The magnetic properties of the Co-Ni-Fe films were obtained by electrochemical deposition by Tikhonov's method. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 123–135. doi: <https://doi.org/10.17587/nmst.22.123-135> (In Russian).
8. Tikhonov R. D., Polomoshnov S. A., Amelichev V. V., Cheremisinov A. A., Kovalev A. M. CoNiFe triple system films formation by electrochemical deposition. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 246–254. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-246-254>
9. Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A., Tikhonov M. R. Ion discharge in electrochemical deposition of CoNiFe films. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2021, vol. 57, iss. 12, pp. 1151–1156. doi: <https://doi.org/10.1134/s1023193521120077>
10. Chason E. Measurement of stress evolution in thin films using real-time *in situ* wafer curvature (k-Space MOS). *k-Space*. Available at: <https://www.k-space.com/wp-content/uploads/MOSforThinFilms.pdf> (accessed: 16.05.2022).
11. Anuriev V. I., Zhestkova I. N. (ed.) *Handbook of master mechanic engineer*, in 3 vol. 8th ed., upd. and rev. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001, vol. 1, 920 p. (In Russian).
12. Vyacheslavov P. M. *Electrolytic deposition of alloys*. 4th ed., upd. and rev. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1977. 94 p. (In Russian).
13. Beloglasov S. M. *Electrochemical hydrogen and metals: behavior and protection from embrittlement*. Kaliningrad, Kaliningrad State University Publ., 2004. 320 p. (In Russian).
14. Damaskin B. B., Petriy O. A., Tsirlina G. A. *Electrochemistry*, study guide. 3rd ed., rev. St. Petersburg, Lan' Publ., 2015. 672 p. Uchebniki dlya vuzov Series. (In Russian).
15. Yang Y. Preparation of Fe-Co-Ni ternary alloys with electrodeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2015, vol. 10, iss. 6, pp. 5164–5175.

The article was submitted 26.11.2021; approved after reviewing 23.03.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the authors

Robert D. Tikhonov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Research Laboratory of New Technological Processes, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), R.Tikhonov@tcen.ru

Sergey A. Polomoshnov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory of New Technological Processes, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), PSA@tcen.ru

Vladimir V. Amelichev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Microsystem Technology Department, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), AVV@tcen.ru

Andrey A. Cheremisinov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Microelectronics and Microsensorics, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), CheremisinovAA@gmail.com

Vadim S. Potapov – Head of the Chemical Laboratory, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), V.Potapov@tcen.ru

Dmitry V. Gorelov – Scientific Researcher of the Research Laboratory of New Microelectromechanical Systems, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gorelovdmittii@gmail.com

Yuri V. Kazakov – Scientific Researcher of the Research Laboratory of Magneticsemiconductor Nano- and Microsystems, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), madvcat@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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Обзорная статья

УДК 621.315.592.3(048.8)

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-439-462

Ионное легирование карбида кремния в технологии приборов силовой электроники. Обзор

А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. В. Лучинин

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, Россия*

ctmid_leti@mail.ru

Аннотация. Ионная имплантация – ключевая и безальтернативная технология легирования карбида кремния SiC в процессах изготовления SiC-приборов. SiC-технология имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с Si-технологией ионного легирования. В работе проведен системный анализ современных технических решений, направленных на формирование методом ионной имплантации локальных легированных областей различного назначения для приборов силовой электроники на основе SiC. Представлены результаты исследований, проведенных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Исследования ориентированы на отработку и выбор режимов ионной имплантации алюминия и фосфора в 4H-SiC-структуру, обеспечивающих заданные концентрации легирующих примесей и геометрические размеры локальных ионно-легированных областей. Разработанные режимы ионной имплантации успешно реализованы при изготовлении образцов силовых 4H-SiC МДП-транзисторов с рабочими напряжениями до 1200 В.

Ключевые слова: карбид кремния SiC, ионная имплантация, локальные легированные области, SRIM-моделирование, профили легирования, активационный отжиг

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 03.G25.31.0243).

Благодарности: авторы выражают благодарность М. В. Четвергову и К. А. Карабешкину за проведение процессов ионной имплантации на импланторе HVEE-500, а также А. И. Михайлову за реализацию SRIM-моделирования и участие в обсуждении полученных результатов.

Для цитирования: Афанасьев А. В., Ильин В. А., Лучинин В. В. Ионное легирование карбида кремния в технологии приборов силовой электроники. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 439–462. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-439-462>

Review article

Ion doping of silicon carbide in the technology of power electronics devices. Review

A. V. Afanasev, V. A. Ilyin, V. V. Luchinin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

cmid_leti@mail.ru

Abstract. In the SiC device fabrication processes ion implantation is a key and non-alternative technology of silicon carbide doping. SiC technology has a number of distinctive features compared to the “silicon” ion doping technology. In this work, an analysis of modern technological solutions aimed at the formation of locally doped regions for various purposes by ion implantation for SiC-power electronics devices is carried out. The results of studies at ETU “LETI” are presented. These studies are focused on the development of Al and P implantations into 4H-SiC which provide the required doping levels and the geometric dimensions of locally doped regions. The developed implantation regimes have been successfully implemented for the manufacturing of power 4H-SiC MOSFETs samples with operating voltages up to 1200 V.

Keywords: silicon carbide SiC, ion implantation, local doping, TRIM simulation, doping profiles, activation annealing

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of Russia (project No. 03.G25.31.0243).

Acknowledgments: the authors express their gratitude to M. V. Chetvergov and K. A. Karabeshkin for carrying out the ion implantation processes on the HVEE-500 implanter, as well as A. I. Mikhailov for the implementation of SRIM modeling and participation in the discussion of the results.

For citation: Afanasev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V. Ion doping of silicon carbide in the technology of power electronics devices. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 439–462. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-439-462>

Введение. Несмотря на большой прогресс, достигнутый за последние три десятилетия в области ионного легирования карбида кремния SiC, данный процесс остается предметом интенсивных исследований ведущих мировых научных и технологических центров, поскольку имплантация является наиболее предпочтительной технологией локального легирования SiC и в настоящее время представляет собой единственный метод, используемый ведущими компаниями-производителями карбидокремниевой электроники.

Формирование на поверхности полупроводникового кристалла локальных областей с необходимыми типом проводимости, уровнем легирования и геометрическими размерами – одна из важнейших технологических задач при создании электронных компонентов [1, 2]. Для этих целей в кремниевой технологии широко используются ионная имплантация и диффузия. Применительно к созданию приборов на основе SiC использование данных процессов имеет ряд особенностей и сопряжено с определенными техническими трудностями, которые не позволяют непосредственно перенести технологические решения локального легирования полупроводника из Si-технологии в SiC-технологии [1].

Локальное легирование кремния. Для кремния локальное легирование основано на хорошо изученном и широко используемом процессе термодиффузии примесей. Данный процесс не может быть адаптирован к технологии приборов на основе SiC в силу нескольких причин. По сравнению с Si в SiC коэффициенты диффузии D легирующих примесей очень малы (рис. 1) и для достижения технологически приемлемых значений D необходимы высокие температуры (более 2000 °C) [3] или/и чрезвычайно длительные процессы. Кроме того, в условиях высоких температур образуется значительное количество точечных термических дефектов, создающих в запрещенной зоне SiC глубокие уровни, которые приводят к компенсации полупроводника [4, 5]. В настоящее время не существует стабильных материалов, обеспечивающих надежное маскирование поверхности SiC при высоких температурах и длительных процессах. Совокупность негативных факторов определила нецелесообразность применения диффузии в технологических маршрутах изготовления SiC-приборов.

Ионная имплантация – единственный метод неростового локального легирования SiC. Она обеспечивает формирование локальных легированных областей, управляемое пространственное распределение примесей за счет изменения энергии ионов с достижением воспроизводимости параметров формируемых структур. Основными отличиями ионной имплантации в SiC по сравнению с Si являются более высокие энергии имплантируемых ионов (сотни килоэлектронвольт), использование повышенных температур SiC-мишени в процессе ионной имплантации и необходимость высокотемпературного активационного отжига (>1500 °C) [6]. С учетом приведенных отличий традиционная Si-технология ионного легирования может быть адаптирована для формирования SiC-приборов и в настоящее время фактически является базовым инструментом при создании подавляющего большинства коммерческой электроники на основе SiC [3, 7], в производстве которой доминируют процессы формирования легированных областей методом эпитаксии [8, 9]. В табл. 1 проиллюстрирована роль процессов эпитаксии и ионной имплантации при создании карбидокремниевой электронной компонентной базы различного функционального назначения.

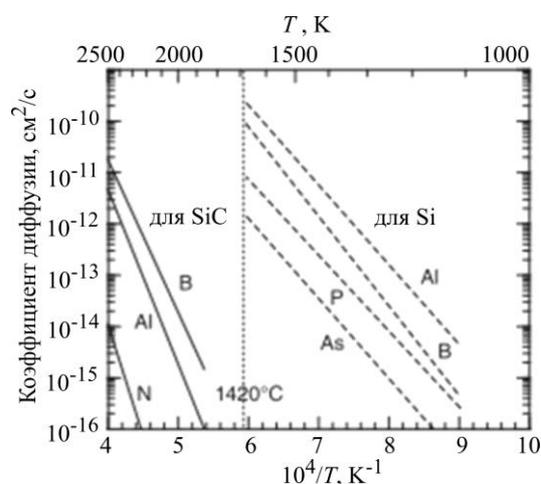


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициентов диффузии основных легирующих примесей в Si и SiC [3]

Fig. 1. Diffusion coefficients temperature dependencies for major dopants in Si and SiC [3]

Таблица 1

Роль процессов эпитаксии и ионной имплантации при создании карбидокремниевой электронной компонентной базы силовой электроники

Table 1

The role of processes of epitaxy and ion implantation in the fabrication of SiC devices for power electronic

Тип прибора	Базовая эпитаксиальная структура, параметры слоев	Ионная имплантация
JBS (MPS)-диоды (600–1700 В)	$n-n^+$	Требуется
	n -подложка (7–20 мкм, $N_d-N_a = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$)	p^+ -слои: блокирующие и инжектирующие области, охранные системы
	n^+ -подложка (350 ± 20 мкм, 0,012–0,025 Ом·см)	
$p-i-n$ -диоды (2000–15 000 В)	p^+-n-n^+	Требуется
	p^+ -подложка (2–5 мкм, $N_a-N_d = 10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$)	p^+ -слои: охранные системы
	n -подложка (20–150 мкм, $N_d-N_a = 10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$)	
n^+ -подложка (350 ± 20 мкм, 0,012–0,025 Ом·см)		
MOSFET (600–1700 В)	$n-n^+$	Требуется
	n -подложка (7–20 мкм, $N_d-N_a = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$)	p -слои: области индуцированного канала транзистора (p -well)
	n^+ -подложка (350 ± 20 мкм, 0,025–0,05 Ом·см)	p^+ -слои: исток, охранные системы n^+ -слои: исток

Цель настоящей работы – системный анализ современных технических решений, направленных на формирование методом ионной имплантации локальных легированных областей с ориентацией на наиболее коммерциализированную приборную нишу SiC – силовую электронику. Также представлены результаты исследований и разработок, проведенных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», в области силовой электроники на SiC, в частности создание диодных и транзисторных структур с использованием технологии ионного легирования SiC акцепторами и донорами – алюминием и фосфором.

Особенности ионной имплантации в SiC. Основными легирующими примесями в SiC аналогично Si являются элементы V группы (доноры) и III группы (акцепторы). Легирование n -типа осуществляется главным образом ионами азота или фосфора. Если необходимо сформировать сильнолегированную n^+ -область ($\gg 10^{19} \text{ см}^{-3}$), то использование фосфора наиболее предпочтительно, так как азот имеет меньшую растворимость и характеризуется комплексообразованием [10], что ограничивает его электрическую активность на уровне $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (табл. 2). Для формирования умеренно легированных n -областей выбор типа примеси и температуры имплантации не имеет решающего значения [3].

Алюминий является основным акцептором, используемым как в технологиях объемного роста и эпитаксии SiC, так и при ионной имплантации. Это обусловлено тем, что альтернативный акцептор – бор – как правило, не используется в промышленном производстве силовых SiC-приборов и может вызвать ряд нежелательных эффектов:

- низкую эффективность p^+ -эмиттеров, обусловленную большей по сравнению с алюминием энергией ионизации бора (см. табл. 2);
- большую по сравнению с алюминием температуру активационного отжига (рис. 2);
- эффекты аномальной диффузии в SiC.

Таблица 2

Энергия ионизации и предел растворимости основных примесей в 4H-SiC [10–13]

Table 2

Ionization energy and solubility limit of major dopants in 4H-SiC [10–13]

Примесь	Энергия ионизации (гексагональная решетка / кубическая решетка), мэВ	Предел растворимости, см ⁻³	Предельная концентра- ция активированной примеси, см ⁻³
Азот	61/125	$2 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{19}$
Фосфор	60/120	$1 \cdot 10^{21}$	$1 \cdot 10^{21}$
Алюминий	198/201	$2 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{21}$
Бор	280	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$

Анализируя процессы аномальной диффузии бора в карбид кремния, необходимо отметить следующее. Наряду с более высоким по сравнению с алюминием коэффициентом диффузии (см. рис. 1), бор имеет особенности распределения (рис. 3), проявляющиеся в формировании приповерхностных (большие концентрации, малые коэффициенты диффузии) и объемных (наоборот, меньшие концентрации, большие коэффициенты диффузии) областей [11]. С одной стороны, это позволяет создавать плавные и глубокие *p-n*-переходы. Однако при формировании активных ионно-имплантированных карманов субмикронных размеров это представляет определенную сложность при воспроизводимости топологии, поскольку необходимо учитывать латеральное распределение бора в приповерхностной области приборной структуры. Тем не менее в работе [16] продемонстрирована успешная реализация высоковольтных 4H-SiC JBS-диодов, где система охранных колец (характерные размеры единицы микрометров) выполнена на основе имплантированного бора с использованием свойства его аномальной диффузии в SiC.

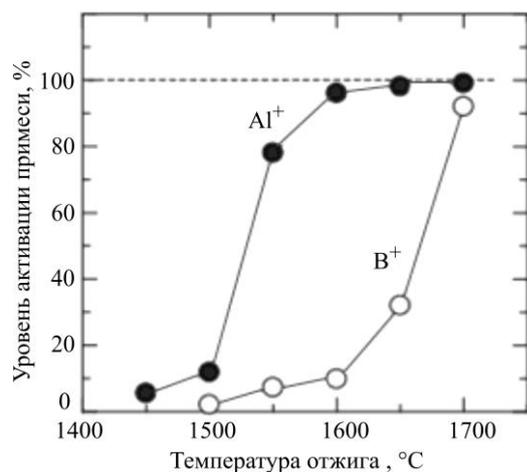


Рис. 2. Зависимость уровней активации алюминия и бора, имплантированных в SiC, от температуры отжига (имплантации проведены при комнатной температуре) [14]

Fig. 2. Activation levels of Al and B implanted in SiC as function of annealing-temperature (the implantations were performed at room temperature) [14]

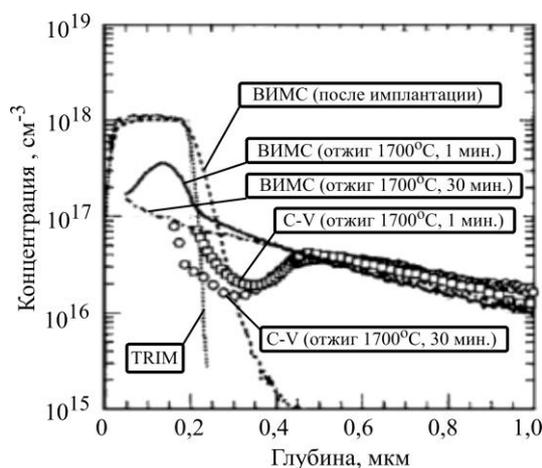


Рис. 3. Концентрационные профили бора, полученные с помощью ВИМС, и концентрация акцепторов, определенная C–V-методом (после отжига при температуре 1700 °C) [15]

Fig. 3. Boron doping profiles obtained by SIMS and net acceptor concentration measured by C–V method (after annealing at temperature 1700 °C) [15]

Перечислим особенности ионной имплантации в SiC, отличающие данную технологию от Si-технологии.

1. Формирование глубоких легированных слоев требует более высоких энергий ионов в пучке, поскольку SiC имеет большую атомную плотность ($9,6 \cdot 10^{22}$ ат./см³) по сравнению с Si ($5 \cdot 10^{22}$ ат./см³), что усиливает торможение ионов.

Задача глубокого ионного легирования может решаться стандартным способом – увеличением энергии ионного пучка, падающего на образец (рис. 4) [17]. При этом образец устанавливается таким образом, чтобы исключить эффект каналирования – аномально глубокого проникновения части ионов вдоль кристаллографических низкоиндексных осей, если направление падающего ионного пучка меньше критического угла [18] по отношению к таким осям. Каналирование чаще всего является нежелательным эффектом. Как правило, ионная имплантация выполняется в разориентированные относительно направления падения ионного пучка монокристаллические образцы, чтобы исключить вероятность данного нежелательного процесса и реализовать так называемую «случайную» имплантацию в мишень в отсутствие эффекта каналирования [19, 20]. С этой же целью применяются слои SiO₂ толщиной до 30 нм, маскирующие имплантируемые поверхности [21].

Пробеги и профили внедренной примеси после имплантации хорошо моделируются методом Монте-Карло с использованием программного пакета SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [22]. Экспериментальные измерения концентрационных профилей обычно проводятся методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) или C–V-методом. На рис. 5 показаны концентрационные ВИМС-профили имплантированного в SiC (0001) азота при различных углах имплантации. Рассчитанный в программе SRIM профиль практически совпадает с экспериментальным при $\alpha = 7^\circ$, начиная с которого эффект каналирования проявляется минимально. Из рисунка видно, что подавление каналирования можно реализовать при углах имплантации более 5° относительно оси [0001] [3].

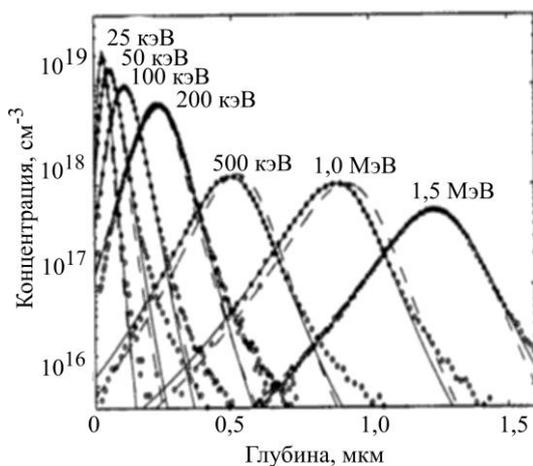


Рис. 4. Концентрационные ВИМС-профили алюминия, имплантированного в SiC при различных энергиях [17]

Fig. 4. Concentration SIMS profiles of aluminum implanted in SiC at different energies [17]

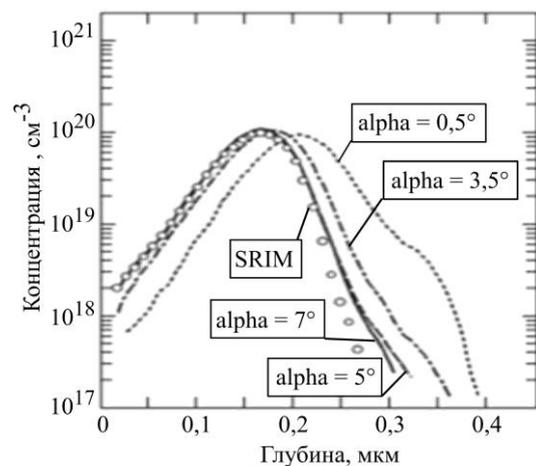


Рис. 5. Концентрационные ВИМС-профили азота, имплантированного в SiC (0001) при различных углах (энергия и доза составляют 100 кэВ и 10^{15} см⁻² соответственно) [3]

Fig. 5. Concentration SIMS profiles of nitrogen implanted in SiC (0001) at different angles (energy and dose are 100 keV and 10^{15} cm⁻², respectively) [3]

В современном производстве силовых SiC-приборов при формировании глубоких профилей легирования часто используют эффект каналирования. Считается, что имплантация с каналированием в оптимальных условиях может иметь неоспоримые преимущества относительно «случайной» имплантации:

- возможность формирования профилей легирования глубиной в единицы микрометров при ускоряющих напряжениях в несколько сотен киловольт с использованием стандартных импланторов кремниевого производства (рис. 6);

- уменьшение количества смещаемых в процессе имплантации атомов С и Si, поскольку в каналах существенно ограничены упругие столкновения легирующих ионов с атомами мишени;

- формирование глубоких профилей легирования без использования толстых (для SiO₂ более 1,5 мкм) маскирующих покрытий (обязательны при использовании высокоэнергетических пучков), что позволяет повысить разрешающую способность литографии при создании топологии локально легированных областей.

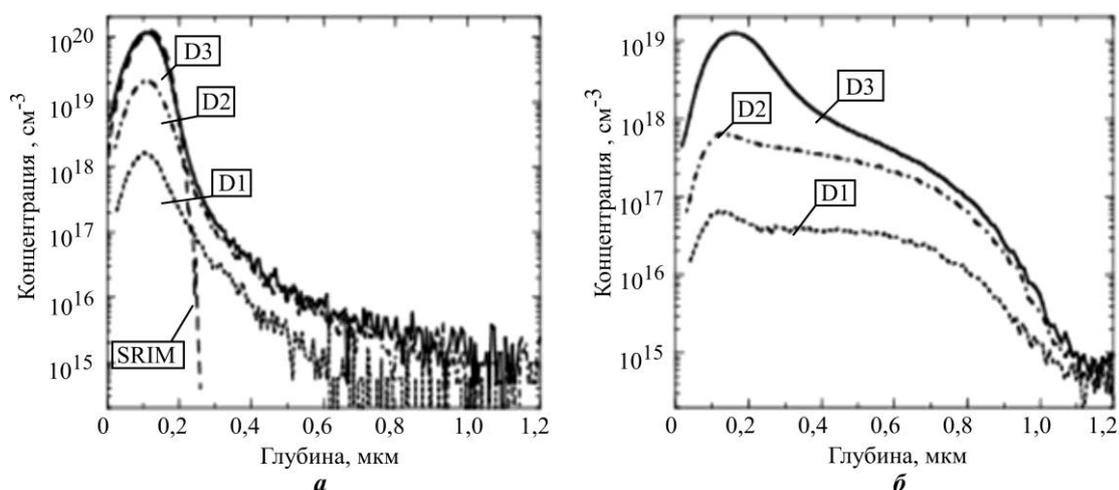


Рис. 6. Концентрационные ВИМС-профили алюминия, имплантированного в SiC при комнатной температуре с энергией 100 кэВ тремя разными дозами ($D1 < D2 < D3$): а – «случайная» имплантация; б – имплантация с использованием эффекта каналирования (нормальное падение ионного пучка на плоскость (0001)) [19]

Fig. 6. Concentration SIMS profiles of 100 keV aluminum implanted in SiC at room temperature with three different doses ($D1 < D2 < D3$): а – random incident implantation; б – channeling implantation (ion beam incidents normally on (0001) plane) [19]

2. Процесс ионной имплантации осуществляется при повышенных температурах мишени (более 400 °С).

При имплантации в SiC, как и при имплантации в Si, с ростом дозы накапливаются радиационные дефекты вплоть до аморфизации мишени. Вследствие более низких пороговых энергий смещения атомов углерода по сравнению с кремнием при малых дозах имплантации разупорядочение С-подрешетки происходит легче, чем Si-подрешетки [23]. В то же время аморфизация углеродной и кремниевой подрешеток имеет место практически при одинаковой дозе имплантации [24]. Для SiC при проведении процесса при комнатной температуре критическая доза, выше которой имплантированная область становится аморфной, составляет примерно $1-5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ [3]. Высокотемпературный активационный отжиг аморфизованного SiC в результате высокодозовой ионной имплантации не гарантирует восстановления кристаллической решетки до структуры исходного политипа, как это обычно происходит в Si. Поэтому при имплантации боль-

ших доз примеси для динамической аннигиляции дефектов, созданных ионным каскадом, ионное легирование проводят в условиях повышенных температур (400–900 °С), что существенно подавляет аморфизацию SiC-мишени [25]. Следует отметить, что преимущества «горячей» имплантации незначительны при малых дозах облучения. Например, в «горячей» имплантации нет необходимости, когда требуется доза в диапазоне 10^{13} – 10^{14} см⁻² [3].

Особенности процесса каналирования для имплантации при повышенных температурах исследованы в работах [19, 26]. Из рис. 7 видно, что влияние эффекта каналирования снижается с ростом температуры мишени вследствие тепловых колебаний и уменьшения сечения каналов [19]. Тем не менее даже при температуре мишени 600 °С достигается глубина, в 3–4 раза превышающая глубину при «случайной» имплантации (см. рис. 6, а). Как следует из рис. 8, профили каналирования ионов бора для имплантации при комнатной температуре и температуре 400 °С сопоставимы, в то время как для ионов ²⁷Al⁺ и еще больше для ионов ⁷¹Ga⁺ глубина каналирования при повышении температуры резко уменьшается. Таким образом, влияние тепловых колебаний на сечения каналов для ионов ¹¹B⁺ невелико по сравнению с ионами ²⁷Al⁺ и ⁷¹Ga⁺, где эффективные сечения каналов относительно малы [26].

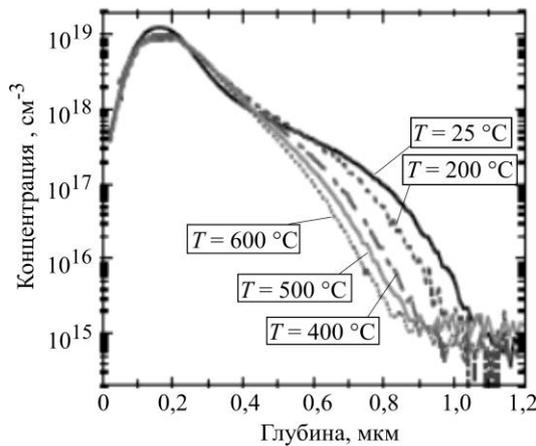


Рис. 7. ВИМС-профили алюминия (100 кэВ, доза $2 \cdot 10^{14}$ см⁻²), имплантированного в 4H-SiC в направлении [000-1] при различных температурах [19]

Fig. 7. SIMS profiles of Al implanted in 4H-SiC along [000-1] (100 keV, $2 \cdot 10^{14}$ cm⁻²) at different temperatures [19]

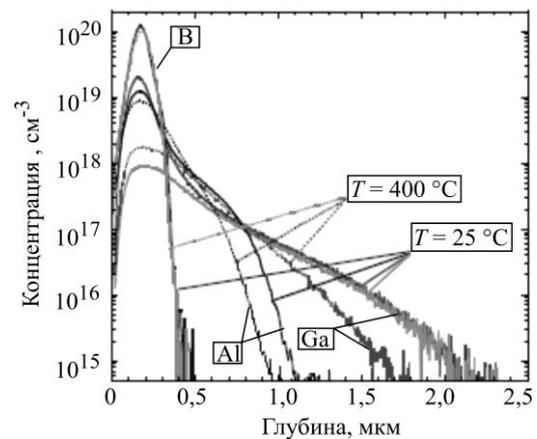


Рис. 8. ВИМС-профили акцепторных примесей (B – 50 кэВ, Al – 100 кэВ, Ga – 240 кэВ), имплантированных в 4H-SiC в направлении [000-1] при комнатной температуре и температуре 400 °С [26]

Fig. 8. SIMS profiles of acceptors (B – 50 keV, Al – 100 keV, Ga – 240 keV) implanted in 4H-SiC along [000-1] at room temperature and at temperature 400 °С [26]

3. Активация внедренной примеси и восстановление кристаллической решетки SiC требуют использования более высокотемпературного активационного отжига (> 1500 °С).

Независимо от дозы и температуры имплантации для электрической активации внедренных примесей и восстановления структуры кристаллической решетки требуется высокотемпературный (> 1500 °С) постимплантационный отжиг. Из-за чрезвычайно низких значений *D* в SiC (см. рис. 1) скорость диффузии большинства имплантированных примесей при постимплантационных отжигах мала, что практически полностью сохраняет форму концентрационного профиля и геометрические размеры исходной ионно-легированной области (рис. 9).

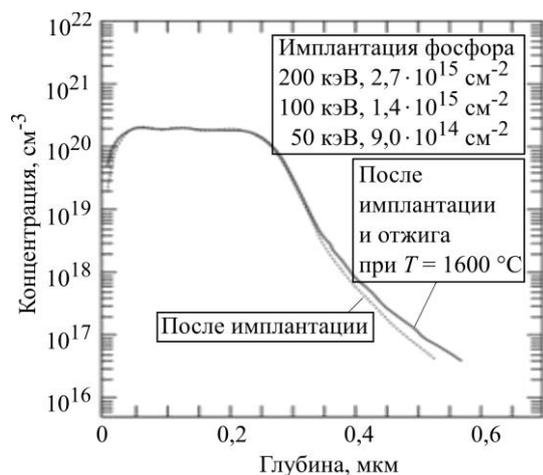


Рис. 9. Распределение по глубине атомов фосфора, имплантированного в 4H-SiC после имплантации и отжига в атмосфере Ar при температуре 1600 °C в течение 30 мин [3]

Fig. 9. Depth profiles of phosphorus atoms implanted in 4H-SiC: as-implanted and after annealing in Ar at temperature 1600 °C for 30 min [3]

Как видно из рис. 10, доля электрически активных примесей *n*- и *p*-типа даже при температурах отжига 1400–1500 °C очень низка. С повышением температуры отжига (1500–1600 °C) наблюдается ее значительный рост. При температуре 1650 °C достигается практически полная активация. В качестве примера на рис. 11 показано поверхностное сопротивление 4H-SiC в зависимости от дозы имплантированных N^{+} -, P^{+} - и Al^{+} -ионов при комнатной температуре и при температуре 500 °C с последующим активационным отжигом при температуре 1700 и 1800 °C [27]. Имплантация ионов проводилась при различных энергиях и дозах для получения «прямоугольного» (box) профиля глубиной около 200 нм. Из рисунка видно, что при имплантации с дозами менее 10^{15} см^{-2} нет существенной разницы в уровне активации примесей, внедренных при комнатной температуре и при «горячей» имплантации, а при имплантации с высокими дозами значительно изменяются электрические свойства слоев при температуре 500 °C. Кроме того, ионное легирование азотом высокими дозами не приводит к увеличению проводимости n^{+} -слоя (см. табл. 2), что, по-видимому, связано с комплексообразованием простых точечных дефектов и примеси [4, 28]. При формировании легированных областей n^{+} -типа лучший эффект активации достигается при имплантации фосфора по сравнению с азотом. Поэтому в настоящее время легирование *n*-типа в 4H-SiC МДП-транзисторах обычно проводят с использованием имплантации фосфора, а температуру имплантации, как правило, ограничивают до 500 °C [27].

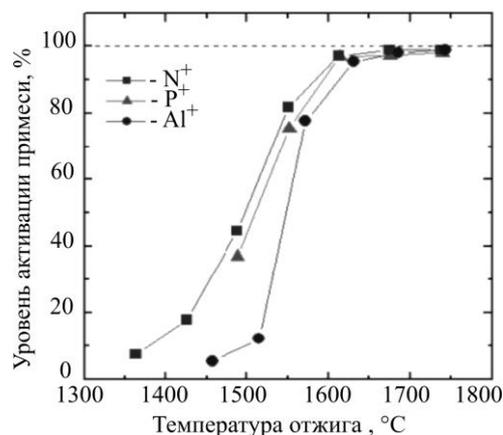


Рис. 10. Зависимость степени электрической активации примесей *n*- и *p*-типов, имплантированных в SiC при комнатной температуре (доза имплантации $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) от температуры отжига [27]

Fig. 10. Electrical activation level of *n*- and *p*-type dopants (N, P and Al) implanted in SiC at room temperature (implantation dose $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) as function of annealing-temperature [27]

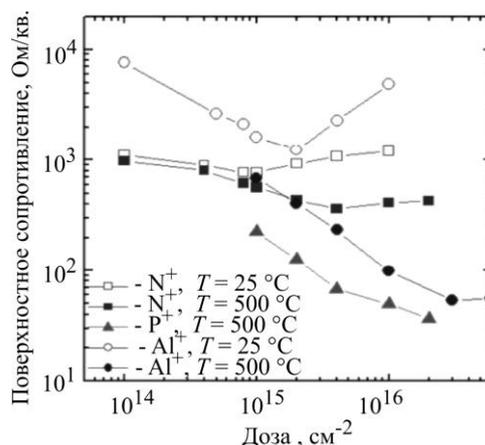


Рис. 11. Зависимость поверхностного сопротивления ионно-легированных (N, P и Al) областей 4H-SiC от дозы имплантированных ионов [27]

Fig. 11. Implanted dose dependence of sheet resistance of ion-doped (N, P and Al) 4H-SiC layers [27]

Важным практическим аспектом является выбор времени постимплантационного отжига. Фактически большинство экспериментальных работ по исследованию электрической активации имплантированных легирующих примесей в SiC относятся к «стационарной» активации, которая предполагает длительное время отжига, обеспечивающее максимальную электрическую активацию примеси для данной концентрации имплантированного вещества и температуры отжига. Установлено, что имплантированные в SiC примеси могут быть эффективно активированы путем отжига при температуре выше 1600 °C (см. рис. 10) в течение 30 мин [3, 27].

4. Возможное изменение состава и структуры поверхности SiC в результате диссоциативного испарения при высокотемпературном активационном отжиге.

Помимо имплантационных радиационных дефектов важной проблемой, характерной для бинарного полупроводника SiC, является деградация поверхности, вызванная высокотемпературным отжигом. Известно, что при температурах отжига в вакууме выше 1000 °C происходит десорбция Si с SiC-поверхности, приводящая к ее графитизации и формированию нежелательного микрорельефа. В ряде работ предложены методы устранения данного эффекта, основанные на создании избыточного давления Si над SiC-поверхностью. Избыточное давление обеспечивается как при использовании газообразного источника Si (отжиг в атмосфере Ar + SiH₄ [29]), так и Si из твердой фазы (SiC-покрытия деталей арматуры камеры отжига [30]).

Результаты исследований влияния имплантации фосфора и алюминия и высокотемпературного отжига на морфологию поверхности 4H-SiC, проведенных методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), приведены на рис. 12 [31]. Из-за разориентации кристалла (4° от [0001]), необходимой для получения качественных 4H-SiC эпитаксиальных слоев [32], поверхность неимплантированного образца (см. рис. 12, а) имеет небольшие параллельные ступени со среднеквадратичной (RMS) шероховатостью, равной 0,12 нм. После отжига при температуре 1650 °C в течение 30 мин в атмосфере Ar + SiH₄ слои, имплантированные фосфором и алюминием, демонстрируют похожую морфологию (см. рис. 12, б, в). Она состоит из больших ступеней, параллельных исходным, наблюдаемым до имплантации (см. рис. 12, а). Характерные RMS-шероховатости для образцов, легированных фосфором и алюминием, составляли 7,89 и 10,9 нм соответственно [31]. Наблюдаемая трансформация морфологии связана как с десорбцией Si, так и с дефектами поверхности кристалла, индуцированными ионной имплантацией. На поверхности создается высокая плотность оборванных связей, что обеспечивает высокую подвижность поверхностных атомов и стимулирует их миграцию, направленную

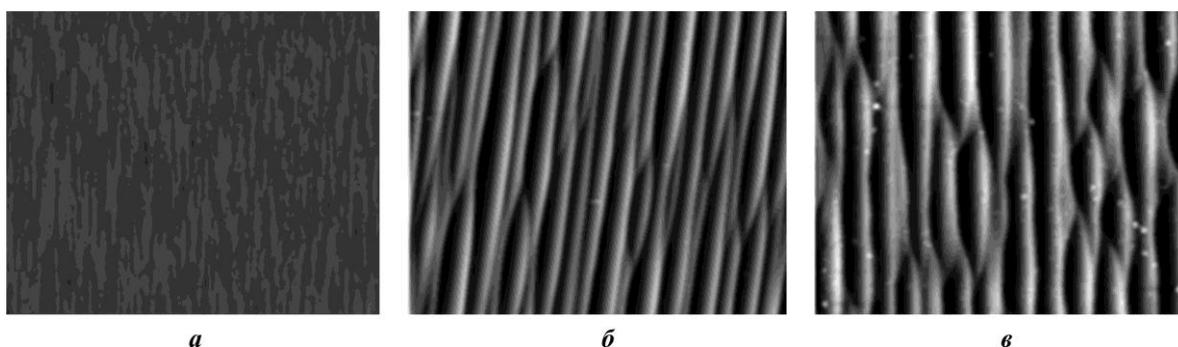


Рис. 12. Морфология поверхности 4H-SiC образцов, полученная с помощью АСМ-сканирования: а – неимплантированный образец; б, в – соответственно образцы *n*- и *p*-типа после отжига при температуре 1650 °C в течение 30 мин [31]

Fig. 12. Surface morphology of 4H-SiC samples obtained by atomic force microscopy: а – non-implanted sample; б – implanted *n*-type sample annealed at temperature 1650 °C for 30 min; в – implanted *p*-type sample annealed at temperature 1650 °C for 30 min [31]

на минимизацию поверхностной энергии кристалла в процессе высокотемпературного отжига. При этом избыточное давление Si не может полностью решить проблему шероховатости поверхности [29].

Следует отметить, что вследствие высокой поверхностной энергии в SiC процесс миграции поверхностных атомов особенно интенсивен. Для минимизации влияния данного процесса поверхность SiC может быть покрыта такими материалами, как SiO₂, AlN или C, которые препятствуют перемещению поверхностных атомов при активационном отжиге. На сегодняшний день применение углеродного защитного слоя (C-слой) – наиболее распространенный подход для предотвращения десорбции Si и образования больших ступеней [32, 33]. Защитный C-слой обычно формируется путем отжига фоторезиста при температуре около 800 °C в атмосфере аргона [33]. В некоторых случаях вместо фоторезиста используют напыление углеродного слоя на поверхность образца. После процесса постимплантационного отжига защитный C-слой удаляют обработкой в кислородной плазме или термическим окислением при температурах 700–800 °C. Из рис. 13 видно, что образец, подвергнутый высокотемпературному постимплантационному отжигу без защитного C-слоя, имеет ярко выраженную ступенчатую поверхность и RMS-шероховатость около 19 нм. При этом практически гладкая морфология (RMS = 2,4 нм), сравнимая с исходным материалом, сохраняется в образце с защитным C-слоем после отжига при температуре 1700 °C [34].

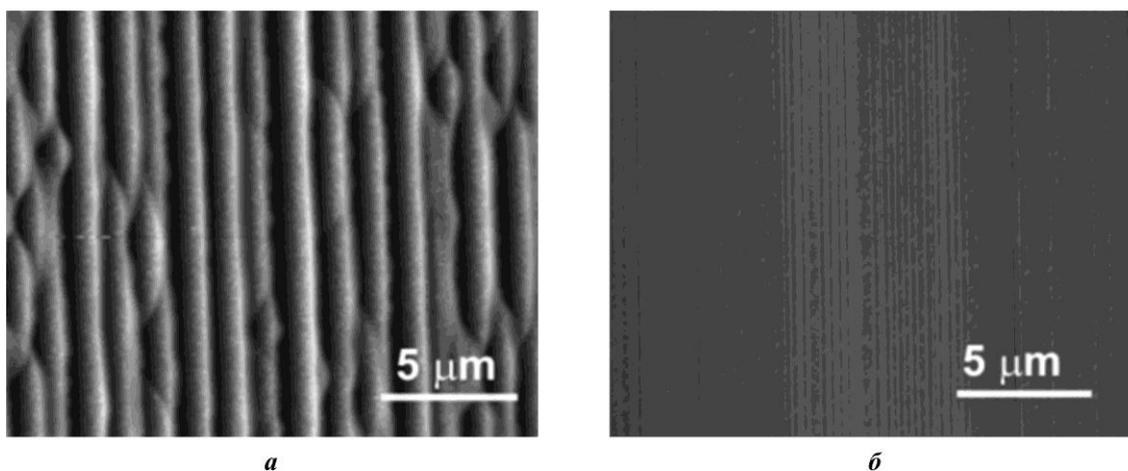


Рис. 13. Морфология ионно-имплантированной алюминием поверхности 4H-SiC после активационного отжига при температуре 1700 °C, полученная методом АСМ: *a* – без защитного слоя (RMS = 19 нм); *б* – с защитным слоем (RMS = 2,4 нм) [33]

Fig. 13. Surface morphology of aluminum implanted 4H-SiC samples after activation annealing at 1700 °C obtained by atomic force microscopy: *a* – without a protective layer (RMS = 19 nm); *b* – with a protective layer (RMS = 2.4 nm) [33]

Очевидно, что условия постимплантационного отжига и, следовательно, морфология и электронные свойства имплантированных поверхностей SiC могут оказывать сильное влияние на электрические свойства контактов и изготовленных на них устройств. Например, омические контакты Ti/Al, сформированные на защищенной поверхности 4H-SiC (см. рис. 13, *б*), показали в среднем более низкое удельное контактное сопротивление (порядка 10^{-4} Ом·см²) по сравнению с контактами, сформированными на незащищенной поверхности (см. рис. 13, *а*) [34].

Таким образом, с учетом рассмотренных особенностей ионного легирования SiC технологический маршрут формирования локально легированных областей в SiC методом ионной имплантации можно представить в виде блок-схемы (рис. 14).

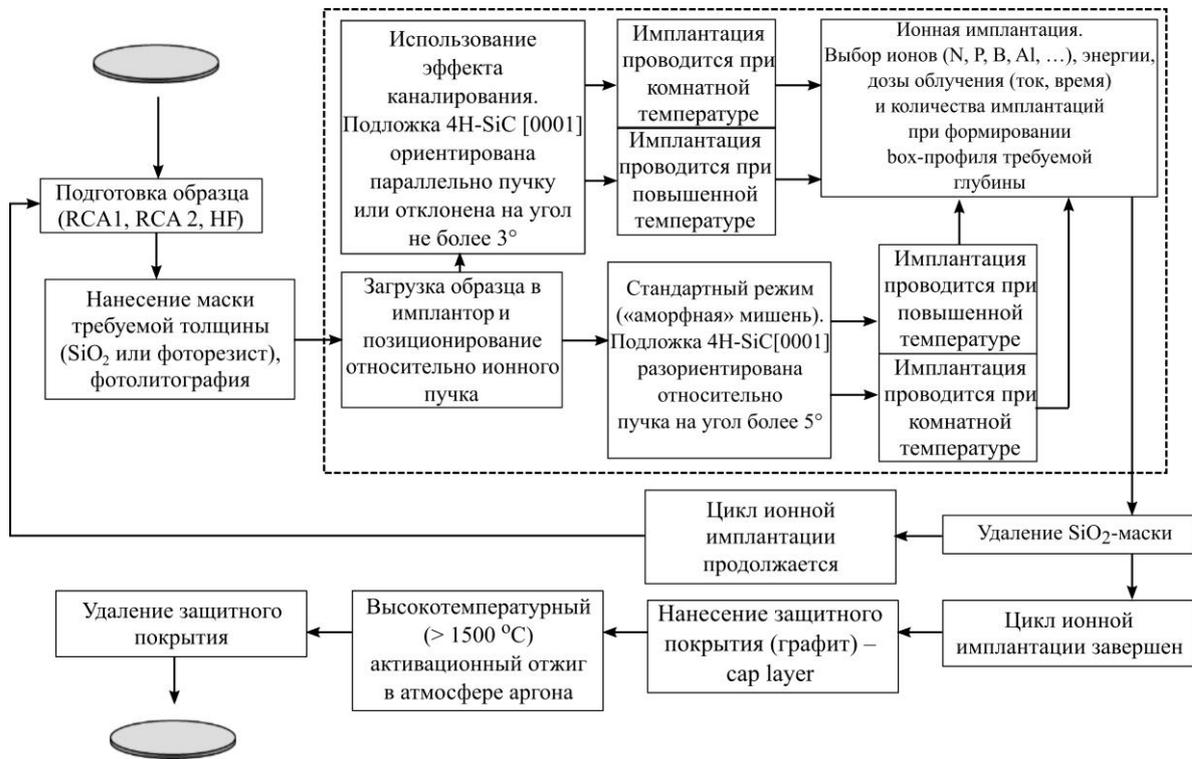


Рис. 14. Технологический маршрут ионной имплантации в SiC
 Fig. 14. Operations sequence of ion implantation in SiC

Формирование ионно-имплантированных областей при изготовлении приборов силовой электроники на основе 4H-SiC. В настоящее время наиболее востребованными приборами силовой электроники на основе SiC являются JBS-диоды и МДП-транзисторы (MOSFET). Ввиду более сложной архитектуры и технологической реализации и, как следствие, высокой стоимости транзисторные структуры и их элементы являются предметом интенсивных исследований, проводимых ведущими компаниями-производителями SiC-приборов и мировыми научными центрами. В настоящее время в основном применяются два типа структур силовых вертикальных МДП-транзисторов: планарный – с горизонтальным расположением канала (рис. 15, а) и траншейный – с каналом, расположенным на вертикальной стенке канавки (рис. 15, б). Транзисторы планарного типа просты в изготовлении, а для создания транзисторов траншейного типа необходимо проводить профилирование поверхности. Кроме того, более высокая скорость роста SiO₂ на боковых стенках канавки (для Si-грани (0001)) и высокая напряженность поля на ее дне создают дополнительные технологические сложности [35]. К преимуществам транзисторов траншейного типа относятся более высокая плотность расположения ячеек, что позволяет снизить приведенное сопротивление во включенном состоянии (на единицу площади кристалла), и более высокая подвижность носителей заряда в плоскости (11–20) [36, 37], чем для Si-грани (0001).

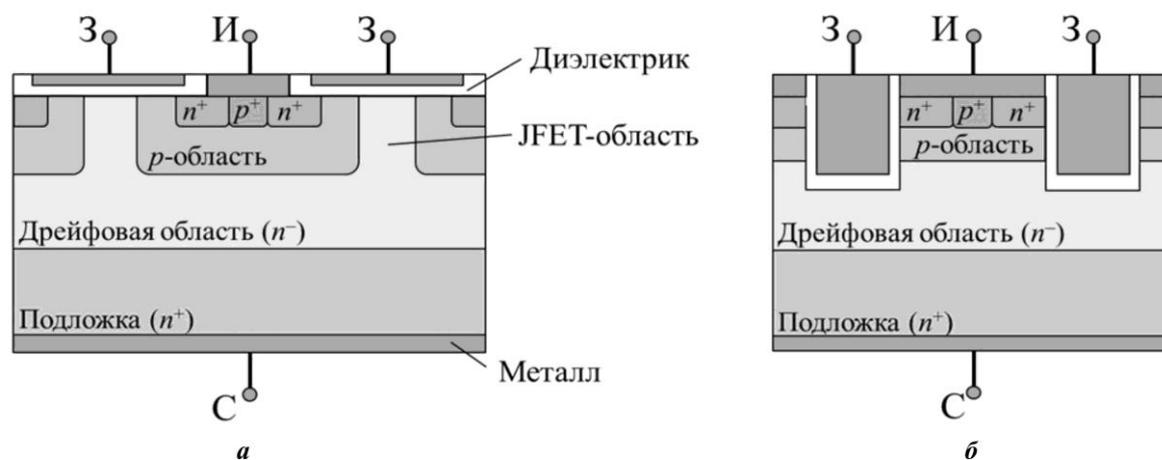


Рис. 15. Типы силовых МОП-транзисторов: а – планарный (DMOSFET); б – траншейный
 Fig. 15. Types of power MOSFETs: a – planar (DMOSFET); b – trench

Активной частью силового МОП-транзистора является низколегированный n^- -слой (дрейфовая область) со сформированными в нем ионной имплантацией p^- , n^+ - и p^+ -областями, типичные параметры которых представлены в табл. 3. Высоколегированная p^+ -область выполняет роль контакта к p^- -области и формируется для выравнивания потенциала между p^- -областью и истоком для нейтрализации паразитного $n-p-n$ -транзистора.

Таблица 3
 Параметры локально легированных областей SiC-приборов [3]
 Table 3
 Parameters of selective-doped regions of SiC devices [3]

Область	Глубина, мкм	Уровень легирования, см^{-3}
Исток (p^+ , n^+)	0,2–0,3	$10^{19} - 10^{20}$
p^- -карман	0,4–0,7	$10^{17} - 10^{18}$
JTE, охранные кольца	0,4–0,8	$10^{16} - 10^{17}$

Силовые вертикальные МОП-транзисторы состоят из массива ячеек [38], что позволяет эффективно использовать площадь полупроводникового кристалла и формировать транзистор с низким сопротивлением во включенном состоянии за счет широкого канала. Наиболее часто используют линейные, прямоугольные (квадратные) и гексагональные ячейки [38]. Преимуществом использования линейных ячеек является возможность применения однослойной металлизации, для прямоугольных и гексагональных ячеек необходима двухслойная металлизация. Однако прямоугольные и гексагональные ячейки имеют более высокую плотность упаковки, что позволяет достичь более низкого сопротивления во включенном состоянии на единицу площади полупроводникового кристалла.

В работе [39] описаны спроектированные и изготовленные МОП-транзисторы планарного типа как более простые по сравнению с транзисторами траншейного типа, демонстрирующие потенциал силовых МОП-транзисторов на 4H-SiC. При проектировании использовали программный пакет Medici TCAD. Транзистор сформирован из массива гексагональных ячеек и плавающих охранных колец, расположенных по периметру прибора (рис. 16).

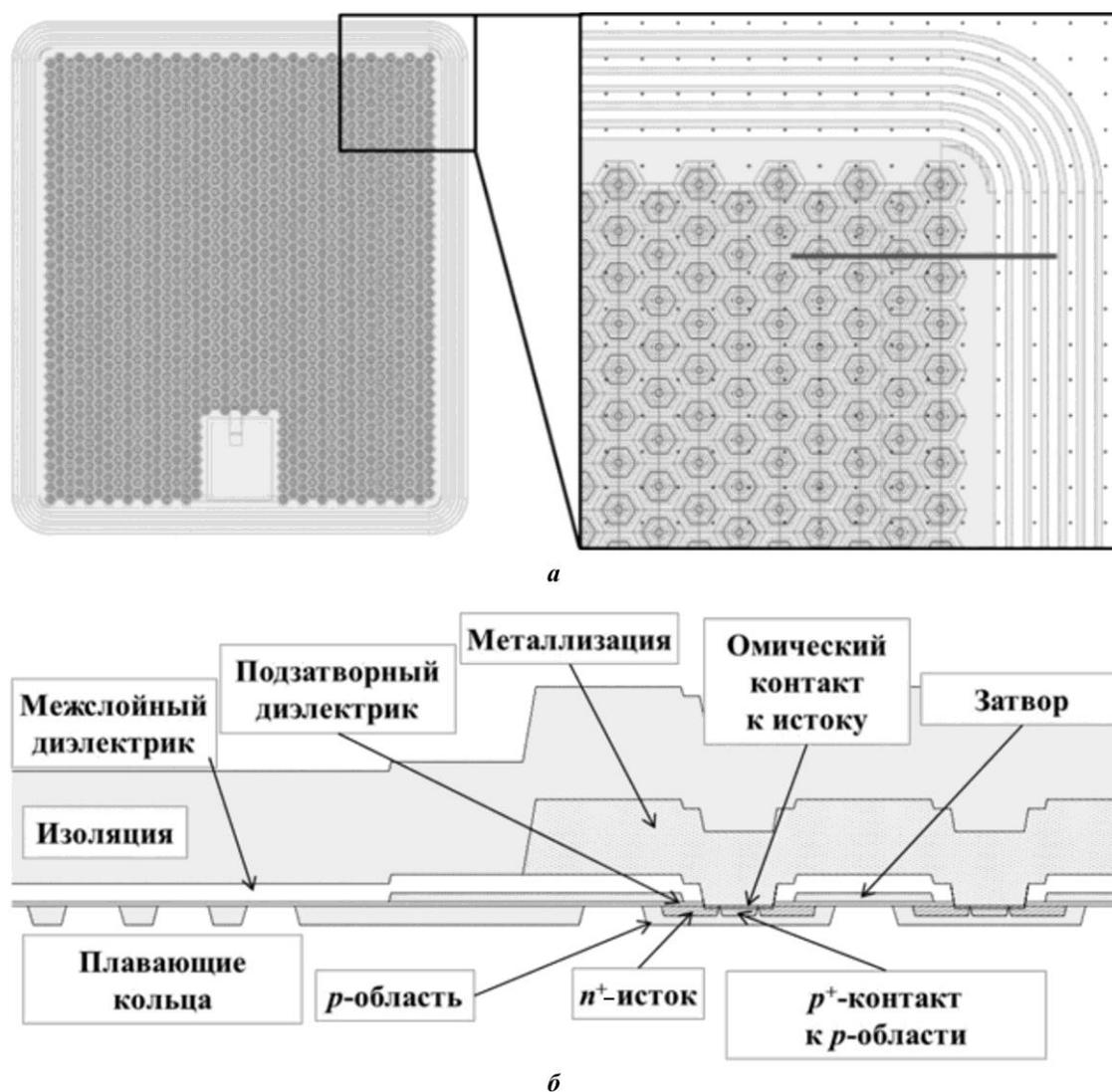


Рис. 16. Структура 4H-SiC МДП-транзистора: а – вид сверху; б – боковое сечение [39]
 Fig. 16. Structure of 4H-SiC MOSFET: a – top view; b – cross section [39]

Для формирования ячейки транзистора требуется имплантация алюминия (p - и p^+ -слои) и фосфора (n^+ -слои) (рис. 17). Уровень легирования p -области, глубину ее залегания и длину канала определяли напряжением пробоя прибора и рассчитывали таким образом, чтобы избежать прокола p -области в закрытом состоянии транзистора, когда область обеднения p - n -перехода, образованного p -областью и дрейфовым n -слоем, достигает n^+ -области стока транзистора. На основании данных табл. 2 и предварительных расчетов сформулированы следующие требования к ионно-имплантированным областям ячейки транзистора (см. рис. 17):

- p -область – глубина 600–700 нм; концентрация 10^{18} см^{-3} ; алюминий;
- n^+ -область – глубина 150–200 нм; концентрация 10^{20} см^{-3} ; фосфор;
- p^+ -область – глубина 150–200 нм; концентрация 10^{20} см^{-3} ; алюминий.

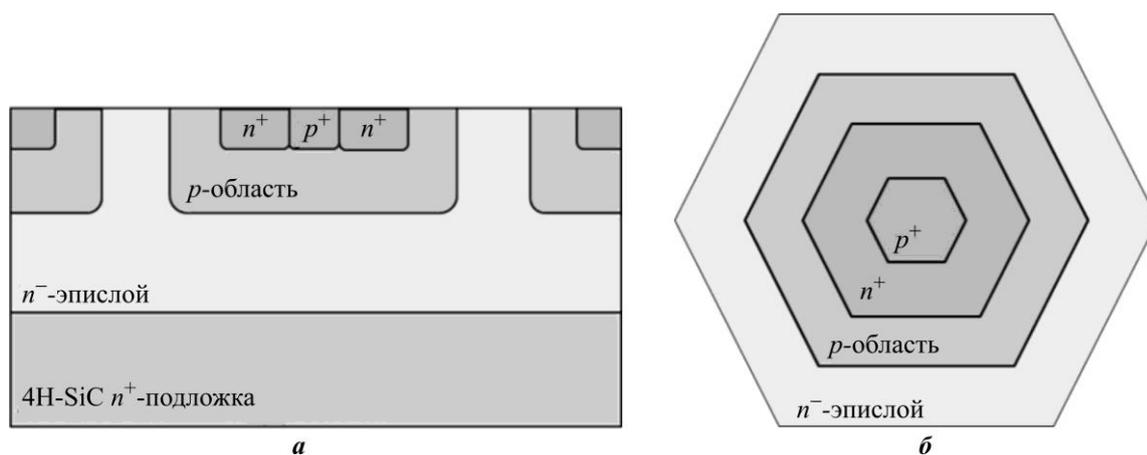


Рис. 17. Гексагональная ячейка МДП-транзистора: а – боковое сечение; б – вид сверху [39]
 Fig. 17. Hexagonal unit cell of MOSFET: a – cross section; b – top view [39]

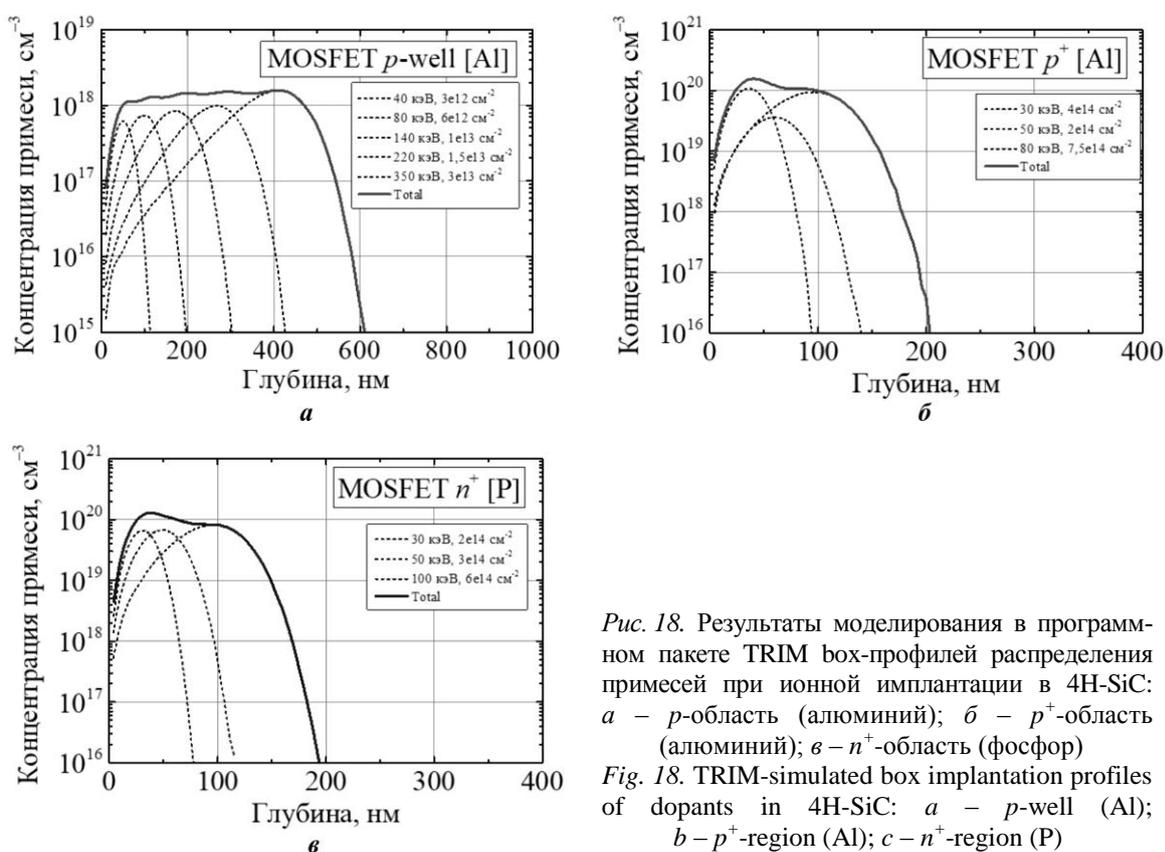


Рис. 18. Результаты моделирования в программном пакете TRIM бох-профилей распределения примесей при ионной имплантации в 4H-SiC: а – p-область (алюминий); б – p⁺-область (алюминий); в – n⁺-область (фосфор)
 Fig. 18. TRIM-simulated box implantation profiles of dopants in 4H-SiC: a – p-well (Al); b – p⁺-region (Al); c – n⁺-region (P)

При создании ионно-имплантированных слоев с профилем легирования прямоугольной формы (бок-профилей) требуемой глубины и концентрации примеси необходимо проведение многократных имплантаций с разными энергиями и дозами ионов. Для решения этой задачи процессы ионной имплантации моделировали методом Монте-Карло, учитывающим поведение большого количества имплантированных ионов, с помощью программного пакета TRIM, входящего в SRIM [22]. Результаты расчетов представлены на рис. 18. Из рисунка видно, что технологические циклы формирования p -, p^+ - и n^+ -областей ячейки МДП-транзистора содержат пять, три и три имплантационных процесса соответственно. Основные параметры ионной имплантации формирования этих слоев, обеспечивающие выполнение указанных требований, приведены в табл. 4.

Таблица 4
Параметры ионной имплантации для формирования p -, p^+ - и n^+ -областей
ячейки МДП-транзистора

Table 4
Ion implantation parameters for the formation of p -, p^+ - and n^+ -regions
of the MOSFET-cell

Ионы	Область	Энергия, кэВ	Доза, см^{-2}	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Al	p	40	$3 \cdot 10^{12}$	500
		80	$6 \cdot 10^{12}$	500
		140	$1 \cdot 10^{13}$	500
		220	$1,5 \cdot 10^{13}$	500
		350	$3 \cdot 10^{13}$	500
Al	p^+	30	$4 \cdot 10^{14}$	500
		50	$2 \cdot 10^{14}$	500
		80	$7,5 \cdot 10^{14}$	500
P	n^+	30	$2 \cdot 10^{14}$	500
		50	$3 \cdot 10^{14}$	500
		100	$6 \cdot 10^{14}$	500

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На стадии отработки технологии формирования ионно-имплантированных областей, а также при изготовлении образцов МДП-транзисторов процессы ионной имплантации алюминия и фосфора проводили с использованием 4H-SiC эпитаксиальных структур типа $n-n^+$. Легированные азотом n -слои выращены методом CVD-эпитаксии на поверхности n^+ -4H-SiC-подложек диаметром 100 мм со стандартной разориентацией от плоскости (0001), равной 4° . Толщины эпитаксиальных слоев и уровни их легирования составляли 11 мкм и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Такие параметры обеспечивают возможность создания диодных и транзисторных структур с максимальными напряжениями до 1200 В [9]. Предварительные исследования проведены на образцах указанных эпитаксиальных структур размером 10×12 мм.

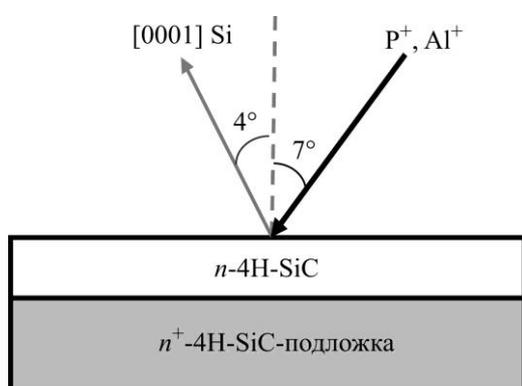


Рис. 19. Ориентация образца в камере имплантора HVEE-500

Fig. 19. Sample orientation in the HVEE-500 implanter chamber

Имплантацию ионов фосфора и алюминия проводили на ускорителе ионов HVEE-500 (High Voltage Engineering Europe B.V.), технические параметры которого обеспечивали необходимые дозы, энергию ионов, а также температуру нагрева образцов. Облучение осуществляли под углом 7° к нормали образца, что характерно для «кремниевых» импланторов. Поэтому при загрузке в камеру образцы ориентировали так, чтобы угол падения ионного пучка относительно направления [0001] Si составлял 11° (рис. 19). Такое размещение образца обеспечивает стандартный режим имплантации в отсутствие канализации (см. рис. 14).

Активационный отжиг ионно-имплантированных образцов проводили в атмосфере аргона при температуре 1600 °С в течение 20 мин. Предварительно на поверхность структуры с имплантированными алюминием и фосфором наносили фоторезист, который впоследствии графитизировался при температуре 850 °С в течение 120 мин, формируя защитный С-слой. Для проведения последующих измерений профилей распределения примесей методом ВИМС и электрической характеристики ионно-имплантированных слоев защитный С-слой удаляли в кислородной плазме.

Концентрационные профили в ионно-имплантированных областях измеряли методом ВИМС на спектрометре IMS-4F (САМЕСА) при травлении поверхности образцов первичными ионами O_2^+ с энергией пучка 5,5 кэВ и токе 700 нА. Для минимизации эффекта зарядки образца при необходимости использовали золотое покрытие.

Следует отметить, что особое внимание уделено исследованиям p -области ячейки (см. рис. 17, *a*), в которой формируется инверсионный канал МДП-транзистора. Известно, что уровень легирования p -области оказывает существенное влияние как на пороговое напряжение, так и на подвижность носителей в канале транзистора. Поэтому контроль электрической активации алюминия и профиля легирования этой области является ключевым фактором воспроизводимости характеристик приборных структур. На рис. 20 в качестве примера приведены профили распределения алюминия при однократной имплантации в 4Н-SiC до и после активационного отжига, полученные методом ВИМС. Из рисунка видно, что постимплантационный отжиг не приводит к заметному изменению распределения алюминия в образцах, что является ожидаемым ввиду его малых коэффициентов диффузии в SiC при температуре 1600 °С (см. рис. 1). Отметим, что экспериментально полученные профили распределения алюминия практически полностью соответствуют результатам SRIM-моделирования в части достижения максимальных значений уровней легирования и формы концентрационного профиля, за исключением «хвостовых» частей. По всей видимости, при разориентации мишени, равной 11°, имеет место так называемый scatter-in-эффект каналирования, проявляющийся при больших углах наклона ионного пучка относительно нормали к поверхности и при достаточно высоких энергиях ионов [20]. Этот эффект обусловлен тем, что часть ионов с высокой энергией после серии столкновений с атомами мишени может попасть в канал и пройти большее расстояние без рассеяния. Это приводит к уширению «хвостовой» части распределения примеси в 4Н-SiC-эпителие даже при отсутствии обычного каналирования, когда ионный пучок падает нормально на плоскость с малыми значе-

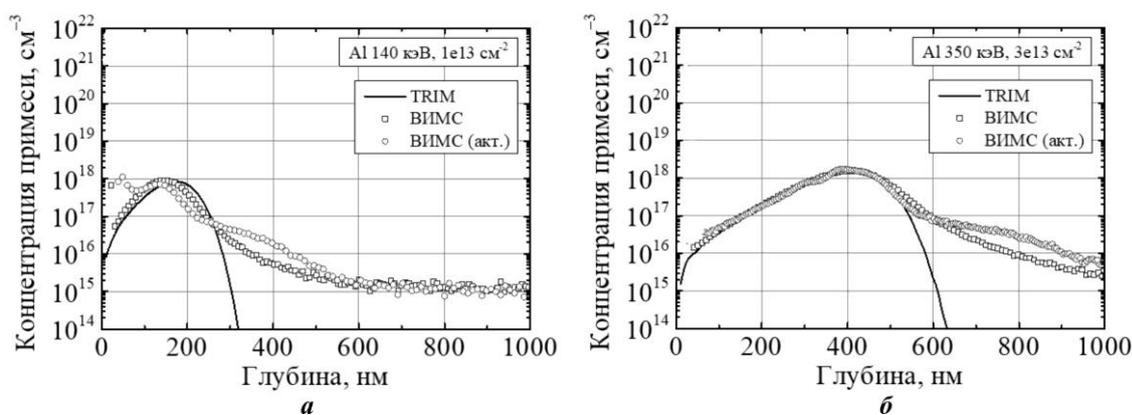


Рис. 20. ВИМС-профили распределения алюминия в 4Н-SiC в результате моноэнергетических имплантаций до и после активационного отжига: *a* – 140 кэВ, 10^{13} см⁻²; *б* – 350 кэВ, $3 \cdot 10^{13}$ см⁻²

Fig. 20. SIMS profiles of aluminum implanted in 4H-SiC for single energy-implantations before and after activation annealing: *a* – 140 keV, 10^{13} cm⁻²; *b* – 350 keV, $3 \cdot 10^{13}$ cm⁻²

ниями индексов Миллера и ионы сразу попадают в канал. Поэтому пакет моделирования TRIM, в котором не учитывается каналирование, не позволяет корректно спрогнозировать поведение «хвоста» распределения имплантированной примеси.

На рис. 21 представлены ВИМС-профили распределения алюминия в 4H-SiC p -области. Прямоугольный профиль легирования получен с помощью пяти имплантационных процессов (см. табл. 3). По результатам измерений методом Холла установлено,

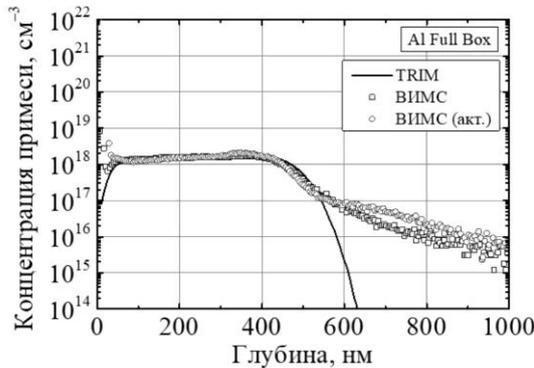


Рис. 21. ВИМС-профили распределения алюминия в 4H-SiC p -области до и после активационного отжига

Fig. 21. SIMS profiles of aluminum implanted in 4H-SiC (p -well) before and after activation annealing

что степень активации алюминия в p -области составляла 96–98 %. Это удовлетворительно соотносится с данными на рис. 2 и позволяет впоследствии использовать описанный режим активационного отжига. На рис. 22 приведены профили распределения примесей для p^+ - и n^+ -областей ячейки МДП-транзистора. Профили также получены с помощью многократных имплантаций в соответствии с данными табл. 3. Как и для моноэнергетических имплантаций, общим для всех областей является наличие уширенных задних фронтов распределения алюминия и фосфора, что, вероятно, обусловлено scatter-in-каналированием.

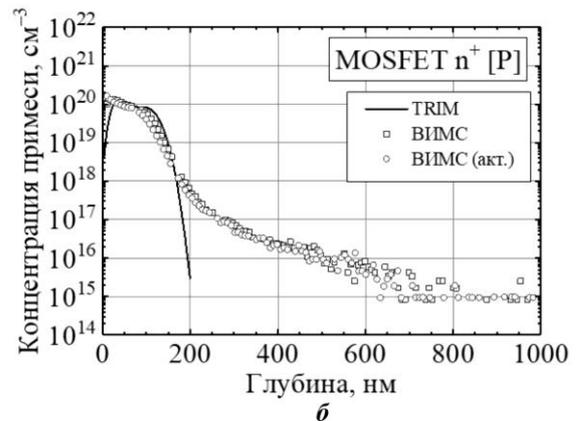
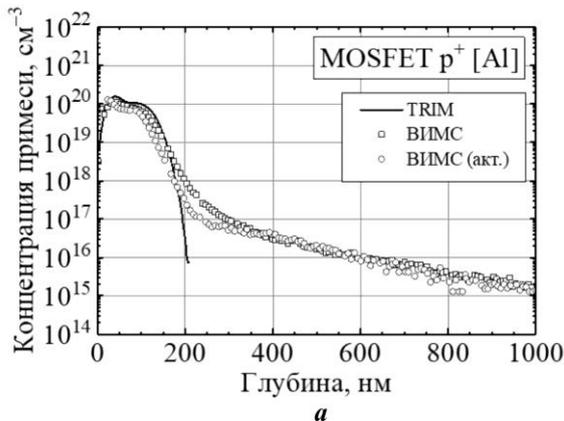


Рис. 22. ВИМС-профили распределения алюминия и фосфора до и после активационного отжига в 4H-SiC p^+ -области (а) и n^+ -области (б) соответственно

Fig. 22. SIMS profiles of aluminum in p^+ -region (а) and B in n^+ -region (б) implanted in 4H-SiC before and after activation annealing

Следует отметить, что на эффект scatter-in-каналирования также влияет наличие оксида на поверхности подложки. В случае обычного каналирования с увеличением толщины оксидного слоя глубина залегания имплантированной примеси уменьшается из-за увеличения рассеяния ионов в оксиде. В случае scatter-in-каналирования при отклонении ионного пучка от нормали к поверхности с увеличением толщины оксида глубина залегания примеси увеличивается, так как с ростом количества столкновений в оксиде повышается вероятность рассеяния ионов на такой угол, который обеспечит их попадание в канал при переходе в подложку. В дальнейшем при достижении некоторой толщины оксида глубина проникновения примеси становится максимальной. Таким

образом, при имплантации через оксид или при серии последовательных имплантаций существуют два конкурирующих процесса: рассеяние ионов из-за аморфизации структуры, что приводит к сужению профилей распределения, и scatter-in-каналирование, которое уширяет профиль распределения. Первый эффект преобладает при сравнительно низких энергиях ионов (для алюминия при имплантации через оксид порядка 30 кэВ), второй – при высоких энергиях (для алюминия при имплантации через оксид более 70 кэВ) [40].

По результатам проведенных исследований отработаны и выбраны оптимальные для имеющегося технологического оборудования режимы ионной имплантации, включенные в технологический маршрут изготовления 4H-SiC МДП-транзистора. Изготовлены и охарактеризованы образцы 4H-SiC МДП-транзисторов с гексагональной ячейкой (см. рис. 16) [39]. С использованием методики, изложенной в работе [41], на рис. 23 представлено РЭМ-изображение ячейки транзистора с соответствующими локально легированными p -, p^+ и n^+ -областями.

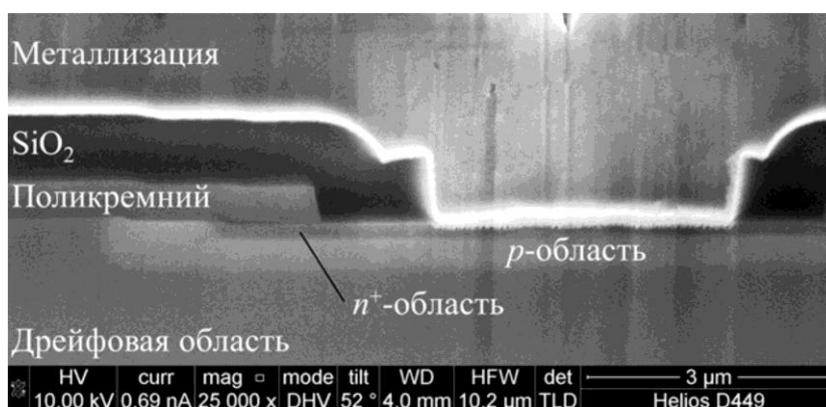


Рис. 23. РЭМ-изображение ячейки силового 4H-SiC МДП-транзистора

Fig. 23. SEM cross section of the unit cell of power 4H-SiC MOSFET

Закключение. Проведенный системный анализ современных технических решений, направленных на формирование методом ионной имплантации локальных легированных областей различного назначения для приборов силовой электроники на основе SiC, показал следующее.

Для 4H-SiC-приборов фосфор и алюминий – наиболее часто используемые легирующие примеси донорного и акцепторного типов соответственно. Их имплантируют при температуре мишени 300–500 °С с последующей электрической активацией при температуре 1500–1800 °С. Для исключения деградации поверхности SiC образец герметизируют защитным слоем на основе углерода.

Полная активация легирующих примесей обычно достигается при низких дозах имплантации, а частичная – при дозах, превышающих 10^{15} см⁻². Неполная ионизация алюминия из-за высокой энергии активации при комнатной температуре является типичной проблемой легирования p -типа независимо от имплантированной дозы. Контроль процесса активации и точное знание глубин профилей электрически активных примесей определяют параметры диодных и транзисторных структур, включая удельное контактное сопротивление, пороговое напряжение, подвижность носителей заряда в канале.

В процессе разработки технологии создания силовых МДП-транзисторов в рамках системных исследований, ориентированных на отработку и выбор режимов ионной имплантации алюминия и фосфора в 4H-SiC при создании локальных областей с требуе-

мыми концентрациями легирующих примесей и геометрическими размерами, определены базовые технологические параметры ионного легирования SiC. Установлено, что при «горячей» (500 °С) имплантации ионов алюминия и фосфора и последующего активационного отжига при температуре 1600 °С в течение 20 мин происходит практически полная электрическая активация внедренных примесей. Во всех выполненных исследованиях ионно-имплантированных структур наблюдается уширение заднего фронта концентрационного профиля, что, по-видимому, вызвано эффектом scatter-in-канализирования при имплантации в отклоненные на 11° от оси [0001] эпитруктуры.

Разработанные режимы ионной имплантации успешно реализованы при изготовлении образцов силовых 4H-SiC МДП-транзисторов с рабочими напряжениями до 1200 В.

Литература

1. Лучинин В. В. Технологии превосходства. Карбид кремния. Научно-технологический статус ЛЭТИ // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 5. С. 259–276.
2. Zetterling C.-M. Integrated circuits in silicon carbide for high-temperature applications // MRS Bulletin. 2015. Vol. 40. P. 431–438. doi: <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.90>
3. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications. Singapore: John Wiley & Sons, 2014. 400 p. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118313534>
4. Вайнер В. С., Ильин В. А. ЭПР обменно связанных пар вакансий в гексагональном карбиде кремния // Физика твердого тела. 1981. Т. 23. № 12. С. 3659–3671.
5. Вейнгер А. И., Ильин В. А., Таиров Ю. М., Цветков В. Ф. Исследование параметров парамагнитных глубоких центров вакансионной природы в 6H-SiC // Физика и техника полупроводников. 1981. Т. 15. № 9. С. 1557–1563.
6. Sadow S. E., Agarwal A. Advances in silicon carbide processing and applications. Boston, MA: Artech House, 2004. 212 p.
7. Hallén A., Linnarsson M. Ion implantation technology for silicon carbide // Surf. & Coat. Techn. 2016. Vol. 306 (A). P. 190–193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.075>
8. Full epitaxial trench type buried grid SiC JBS diodes / S. A. Reshanov, A. Schöner, W. Kaplan et al. // ECS Trans. 2014. Vol. 64. No. 7. P. 289–293. doi: <https://doi.org/10.1149/06407.0289ecst>
9. Афанасьев А. В., Ильин В. А., Лучинин В. В., Решанов С. А. Анализ эпитаксии карбида кремния из газовой фазы как базового процесса в технологии силовой электроники. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 6. С. 483–496. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-6-483-496>
10. Bockstedte M., Mattausch A., Pankratov O. Solubility of nitrogen and phosphorus in 4H-SiC: A theoretical study // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. Iss. 1. P. 58–60. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1769075>
11. Лебедев А. А. Центры с глубокими уровнями в карбиде кремния. Обзор // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. № 2. С. 129–155.
12. Parfenova I. I., Reshanov S. A., Rastegaev V. P. Solubility of impurities in silicon carbide during vapor growth // Inorganic Materials. 2002. Vol. 38. Iss. 5. P. 476–481. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1015471021894>
13. Ivanov I. G., Henry A., Janzén E. Ionization energies of phosphorus and nitrogen donors and aluminum acceptors in 4H silicon carbide from the donor-acceptor pair emission // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. Iss. 24. Art. No. 241201. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.241201>
14. Al⁺ and B⁺ implantations into 6H-SiC epilayers and application to PN junction diodes / T. Kimoto, O. Takemura, H. Matsunami et al. // J. Electron. Mater. 1998. Vol. 27 (4). P. 358–364. doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-998-0415-6>
15. Negoro Y., Kimoto T., Matsunami H. Carrier compensation near tail region in aluminum- or boron-implanted 4H-SiC (0001) // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. Iss. 4. Art. No. 043709. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2030411>
16. Высоковольтные (3,3 кВ) JBS-диоды на основе 4H-SiC / П. А. Иванов, И. В. Грехов, Н. Д. Ильинская и др. // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. № 5. С. 677–681.
17. Janson M. S., Linnarsson M. K., Hallén A., Svensson B. G. Ion implantation range distributions in silicon carbide // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. Iss. 11. P. 8903–8909. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1569666>

18. **Lindhard J.** Influence of crystal lattice on motion of energetic charge particles // *Matematisk-fysiske meddelelser*. 1965. Vol. 34 (14). P. 1–64.
19. **Hallén A., Linnarsson M. K., Vines L.** Recent advances in the doping of 4H-SiC by channeled ion implantation // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 963. P. 375–381. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.963.375>
20. **Вавилов В. С., Челябинский А. Р.** Ионная имплантация примеси в монокристаллы кремния: эффективность метода и радиационные нарушения // *УФН*. 1995. Т. 165. № 3. С. 347–358. doi: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199503g.0347>
21. Silicon carbide MOSFET technology / **D. M. Brown, E. Downey, M. Ghezzeo et al.** // *Solid-State Electronics*. 1996. Vol. 39. Iss. 11. P. 1531–1542. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(96\)00079-2](https://doi.org/10.1016/0038-1101(96)00079-2)
22. **Ziegler J. F.** The stopping and range of ions in matter software // SRIM [Электронный ресурс]. URL: <http://www.srim.org/SRIM/> (дата обращения: 12.04.2022).
23. **Афанасьев А. В., Ильин В. А., Казарин И. Г., Петров А. А.** Исследования термической стабильности и радиационной стойкости диодов Шоттки на основе карбида кремния // *ЖТФ*. 2001. Т. 71. № 5. С. 78–81.
24. Damage evolution and recovery in Al-implanted 4H-SiC / **Y. Zhang, W. J. Weber, W. Jiang et al.** // *Materials Science Forum*. 2002. Vol. 389–393. P. 815–818. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.389-393.815>
25. **Negoro Y., Miyamoto N., Kimoto T., Matsunami H.** Remarkable lattice recovery and low sheet resistance of phosphorus implanted 4H-SiC (11–20) // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80. Iss. 2. P. 240–242. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1432745>
26. **Linnarsson M. K., Hallén A., Vines L.** Intentional and unintentional channeling during implantation of p-dopants in 4H-SiC // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1004. P. 689–696. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1004.689>
27. Selective doping in silicon carbide power devices / **F. Roccaforte, P. Fiorenza, M. Vivona et al.** // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 14. Art. No. 3923. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14143923>
28. **Aichinger T., Lenahan P. M., Tuttle B. R., Peters D.** A nitrogen-related deep level defect in ion implanted 4H-SiC p-n junctions – a spin dependent recombination study // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100. Iss. 11. Art. No. 112113. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3695330>
29. High temperature implant activation in 4H and 6H-SiC in a silane ambient to reduce step bunching / **S. E. Saddow, J. R. Williams, T. Isaacs-Smith et al.** // *Materials Science Forum*. 2000. Vol. 338–342. P. 901–904. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.338-342.901>
30. **Rambach M., Bauer A. J., Ryssel H.** Electrical and topographical characterization of aluminum implanted layers in 4H silicon carbide // *Physica Status Solidi B*. 2008. Vol. 245. Iss. 7. P. 1315–1326. doi: <https://doi.org/10.1002/pssb.200743510>
31. Correlation study of morphology, electrical activation and contact formation of ion implanted 4H-SiC / **M. H. Weng, F. Roccaforte, F. Giannazzo et al.** // *Solid State Phenomena*. 2010. Vol. 156–158. P. 493–498. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.156-158.493>
32. **Negoro Y., Katsumoto K., Kimoto T., Matsunami H.** Flat surface after high-temperature annealing for phosphorus-ion implanted 4H-SiC (0001) using graphite cap // *Materials Science Forum*. 2004. Vol. 457–460. P. 933–936. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.457-460.933>
33. Protection of selectively implanted and patterned silicon carbide surfaces with graphite capping layer during post-implantation annealing / **K. V. Vassilevski, N. G. Wright, I. P. Nikitina et al.** // *Semicond. Sci. Technol.* 2005. Vol. 20. No. 3. P. 271–278. doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/3/003>
34. Structural and transport properties in alloyed Ti/Al Ohmic contacts formed on p-type Al-implanted 4H-SiC annealed at high temperature / **A. Frazzetto, F. Giannazzo, R. Lo Nigro et al.** // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. Vol. 44. No. 25. Art. No. 255302. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/25/255302>
35. 4H-SiC trench MOSFET with bottom oxide protection / **Y. Kagawa, N. Fujiwara, K. Sugawara et al.** // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 778–780. P. 919–922. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.919>
36. Effects of interface state density on 4H-SiC n-channel field-effect mobility / **H. Yoshioka, J. Senzaki, A. Shimozato et al.** // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104. Iss. 8. Art. No. 083516. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4866790>
37. Interface properties of metal-oxide-semiconductor structures on 4H-SiC {0001} and (1120) formed by N₂O oxidation / **T. Kimoto, Y. Kanzaki, M. Noborio et al.** // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 44. No. 3R. P. 1213–1218. doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.1213>

38. **Baliga V. J.** Fundamentals of power semiconductor devices. Boston, MA: Springer US, 2008. XXIII, 1069 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47314-7>
39. Отечественная карбидокремниевая электронная компонентная база – силовой SiC МДП-транзистор / **А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. В. Лучинин и др.** // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 5. С. 308–316.
40. Detailed analysis and precise modeling of multiple-energy Al implantations through SiO₂ layers into 4H-SiC / **K. Mochizuki, T. Someya, T. Takahama et al.** // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55. Iss. 8. P. 1997–2003. doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2008.926631>
41. Характеризация функциональных областей карбидокремниевых эпитаксиальных и приборных структур методом РЭМ в режиме контраста легирования / **А. В. Афанасьев, В. А. Голубков, В. А. Ильин и др.** // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 6. С. 72–77.

Обзор поступил в редакцию 02.03.2022 г.; одобрен после рецензирования 28.03.2022 г.;
принят к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторах

Афанасьев Алексей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), a_afanasjev@mail.ru

Ильин Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), ilyincmid@gmail.com

Лучинин Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), cmid_leti@mail.ru

References

1. Luchinin V. V. Technologies of superiority. Silicon carbide. Scientific-technological status of LETI. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2016, vol. 18, no. 5, pp. 259–271. (In Russian).
2. Zetterling C.-M. Integrated circuits in silicon carbide for high-temperature applications. *MRS Bulletin*, 2015, vol. 40, pp. 431–438. doi: <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.90>
3. Kimoto T., Cooper J. A. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications*. Singapore, John Wiley & Sons, 2014. 400 p. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118313534>
4. Vainer V. S., Ilin V. A. Electron spin resonance of exchange-couple vacancy pairs in hexagonal silicon carbide. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 1981, vol. 23, no. 12, pp. 3659–3671. (In Russian).
5. Veinger A. I., Ilyin V. A., Tairov Yu. M., Tsvetkov V. F. Investigation of parameters of paramagnetic deep centers of vacancy nature in 6H-SiC. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 1981, vol. 15 (9), pp. 1557–1563. (In Russian).
6. Saddow S. E., Agarwal A. *Advances in silicon carbide processing and applications*. Boston, MA, Artech House, 2004. 212 p.
7. Hallén A., Linnarsson M. Ion implantation technology for silicon carbide. *Surf. & Coat. Techn.*, 2016, vol. 306 (A), pp. 190–193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.075>
8. Reshanov S. A., Schöner A., Kaplan W., Zhang A., Lim J.-K., Bakowski M. Full epitaxial trench type buried grid SiC JBS diodes. *ECS Trans.*, 2014, vol. 64, no. 7, pp. 289–293. doi: <https://doi.org/10.1149/06407.0289ecst>
9. Afanasev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V., Reshanov S. A. Analysis of the gas phase epitaxy of silicon carbide as a basic process for power electronics technology. Review. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 6, pp. 483–496. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-6-483-496>

10. Bockstedte M., Mattausch A., Pankratov O. Solubility of nitrogen and phosphorus in 4H-SiC: A theoretical study. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 85, iss. 1, pp. 58–60. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1769075>
11. Lebedev A. A. Deep level centers in silicon carbide: A review. *Semiconductors*, 1999, vol. 33, iss. 2, pp. 129–155. doi: <https://doi.org/10.1134/1.1187657>
12. Parfenova I. I., Reshanov S. A., Rastegaev V. P. Solubility of impurities in silicon carbide during vapor growth. *Inorganic Materials*, 2002, vol. 38, iss. 5, pp. 476–481. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1015471021894>
13. Ivanov I. G., Henry A., Janzén E. Ionization energies of phosphorus and nitrogen donors and aluminum acceptors in 4H silicon carbide from the donor-acceptor pair emission. *Phys. Rev. B*, 2005, vol. 71, iss. 24, art. no. 241201. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.241201>
14. Kimoto T., Takemura O., Matsunami H., Nakata T., Inoue M. Al⁺ and B⁺ implantations into 6H-SiC epilayers and application to PN junction diodes. *J. Electron. Mater.*, 1998, vol. 27 (4), pp. 358–364. doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-998-0415-6>
15. Negoro Y., Kimoto T., Matsunami H. Carrier compensation near tail region in aluminum- or boron-implanted 4H-SiC (0001). *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, art. no. 043709. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2030411>
16. Ivanov P. A., Grekhov I. V., Il'inskaya N. D., Kon'kov O. I., Potapov A. S., Samsonova T. P., Serebrennikova O. U. High-voltage (3.3 kV) 4H-SiC JBS diodes. *Semiconductors*, 2011, vol. 45, pp. 668–672. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063782611050125>
17. Janson M. S., Linnarsson M. K., Hallén A., Svensson B. G. Ion implantation range distributions in silicon carbide. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, iss. 11, pp. 8903–8909. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1569666>
18. Lindhard J. Influence of crystal lattice on motion of energetic charge particles. *Matematisk-fysiske meddelelser*, 1965, vol. 34 (14), pp. 1–64.
19. Hallén A., Linnarsson M. K., Vines L. Recent advances in the doping of 4H-SiC by channeled ion implantation. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 963, pp. 375–381. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.963.375>
20. Vavilov V. S., Chelyadinskii A. R. Impurity ion implantation into silicon single crystals: efficiency and radiation damage. *Phys. Usp.*, 1995, vol. 38, pp. 333–343. doi: <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n03ABEH000079>
21. Brown D. M., Downey E., Ghezzi M., Kretschmer J., Krishnamurthy V., Hennessy W., Michon G. Silicon carbide MOSFET technology. *Solid-State Electronics*, 1996, vol. 39, iss. 11, pp. 1531–1542. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(96\)00079-2](https://doi.org/10.1016/0038-1101(96)00079-2)
22. Ziegler J. F. The stopping and range of ions in matter software. *SRIM*. Available at: <http://www.srim.org/SRIM/> (accessed: 12.04.2022).
23. Afanas'ev A. V., Il'in V. A., Kazarin I. G., Petrov A. A. Thermal stability and radiation hardness of SiC-based Schottky-barrier diodes. *Tech. Phys.*, 2001, vol. 46, pp. 584–586. doi: <https://doi.org/10.1134/1.1372950>
24. Zhang Y., Weber W. J., Jiang W., Hallén A., Possnert G. Damage evolution and recovery in Al-implanted 4H-SiC. *Materials Science Forum*, 2002, vol. 389–393, pp. 815–818. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.389-393.815>
25. Negoro Y., Miyamoto N., Kimoto T., Matsunami H. Remarkable lattice recovery and low sheet resistance of phosphorus implanted 4H-SiC (11–20). *Appl. Phys. Lett.*, 2002, vol. 80, iss. 2, pp. 240–242. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1432745>
26. Linnarsson M. K., Hallén A., Vines L. Intentional and unintentional channeling during implantation of p-dopants in 4H-SiC. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 1004, pp. 689–696. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1004.689>
27. Roccaforte F., Fiorenza P., Vivona M., Greco G., Giannazzo F. Selective doping in silicon carbide power devices. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 14, art. no. 3923. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14143923>
28. Aichinger T., Lenahan P. M., Tuttle B. R., Peters D. A nitrogen-related deep level defect in ion implanted 4H-SiC p-n junctions – a spin dependent recombination study. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, iss. 11, art. no. 112113. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3695330>
29. Sadow S. E., Williams J. R., Isaacs-Smith T., Capano M. A., Cooper J. A., Mazzola M. S., Hsieh A. J., Casady J. B. High temperature implant activation in 4H and 6H-SiC in a silane ambient to reduce step bunching. *Materials Science Forum*, 2000, vol. 338–342, pp. 901–904. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.338-342.901>
30. Rambach M., Bauer A. J., Ryssel H. Electrical and topographical characterization of aluminum implanted layers in 4H silicon carbide. *Physica Status Solidi B*, 2008, vol. 245, iss. 7, pp. 1315–1326. doi: <https://doi.org/10.1002/pssb.200743510>

31. Weng M. H., Roccaforte F., Giannazzo F., Di Franco S., Bongiorno C., Zanetti E., Ruggiero A., Saggio M., Raineri V. Correlation study of morphology, electrical activation and contact formation of ion implanted 4H-SiC. *Solid State Phenomena*, 2010, vol. 156–158, pp. 493–498. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.156-158.493>
32. Negoro Y., Katsumoto K., Kimoto T., Matsunami H. Flat surface after high-temperature annealing for phosphorus-ion implanted 4H-SiC (0001) using graphite cap. *Materials Science Forum*, 2004, vol. 457–460, pp. 933–936. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.457-460.933>
33. Vassilevski K. V., Wright N. G., Nikitina I. P., Horsfall A. B., O'Neill A. G., Uren M. J., Hilton K. P., Masterton A. G., Hydes A. J., Johnson C. M. Protection of selectively implanted and patterned silicon carbide surfaces with graphite capping layer during post-implantation annealing. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, vol. 20, no. 3, pp. 271–278. doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/3/003>
34. Frazzetto A., Giannazzo F., Lo Nigro R., Raineri V., Roccaforte F. Structural and transport properties in alloyed Ti/Al Ohmic contacts formed on p-type Al-implanted 4H-SiC annealed at high temperature. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2011, vol. 44, no. 25, art. no. 255302. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/25/255302>
35. Kagawa Y., Fujiwara N., Sugawara K., Tanaka R., Fukui Y., Yamamoto Y., Miura N., Imaizumi M., Nakata S., Yamakawa S. 4H-SiC trench MOSFET with bottom oxide protection. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 778–780, pp. 919–922. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.919>
36. Yoshioka H., Senzaki J., Shimozato A., Tanaka Y., Okumura H. Effects of interface state density on 4H-SiC n-channel field-effect mobility. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, iss. 8, art. no. 083516. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4866790>
37. Kimoto T., Kanzaki Y., Noborio M., Kawano H., Matsunami H. Interface properties of metal-oxide-semiconductor structures on 4H-SiC {0001} and (1120) formed by N₂O oxidation. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 44, no. 3R, pp. 1213–1218. doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.1213>
38. Baliga B. J. *Fundamentals of power semiconductor devices*. Boston, MA, Springer US, 2008. xxiii, 1069 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47314-7>
39. Afanasyev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V., Mikhaylov A. I., Reshanov S. A., Schöner A. Russian silicon carbide electronic component base – power SiC MOSFET. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2016, vol. 18, no. 5, pp. 308–316. (In Russian).
40. Mochizuki K., Someya T., Takahama T., Onose H., Yokoyama N. Detailed analysis and precise modeling of multiple-energy Al implantations through SiO₂ layers into 4H-SiC. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, vol. 55, iss. 8, pp. 1997–2003. doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2008.926631>
41. Afanasev A. V., Golubkov V. A., Ilyin V. A., Luchinin V. V., Ryabko A. A., Sergushichev K. A., Trushlyakova V. V., Reshanov S. A. Characterization of functional areas of silicon carbide epitaxial and device structures by SEM in dopant contrast mode. *Izvestia SPbETU "LETI" = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal*, 2020, no. 6, pp. 72–77. (In Russian).

The review was submitted 02.03.2022; approved after reviewing 28.03.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the authors

Aleksei V. Afanasev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), a_afanasjev@mail.ru

Vladimir A. Ilyin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), ilyincmid@gmail.com

Viktor V. Luchinin – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), cmid_leti@mail.ru

Моделирование процесса распыления карбида кремния фокусированным пучком ионов галлия

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

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

lemi@miee.ru

Аннотация. Моделирование процессов распыления материалов ускоренными ионами существенно упрощает прецизионное формирование микро- и наноструктур методом фокусированного ионного пучка. Метод Монте-Карло является одним из широко распространенных подходов для такого моделирования, и для его корректного применения необходимы данные о поверхностной энергии связи атомов образца. В работе для получения данных о поверхностной энергии связи для карбида кремния экспериментально изготовлены тестовые структуры, представляющие собой прямоугольные области, распыляемые ионами галлия с дозой 10^{17} см⁻². Поперечные сечения областей исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Получено среднее значение концентрации галлия в окрестности ее максимума, равное $\langle C_{\text{Ga}} \rangle_{\text{exp}} = 25$ ат. %. Это значение и коэффициент распыления $Y_{\text{exp}} = 2,1$ использованы для сравнения с помощью R -фактора с результатами вычислений, выполненных в программном пакете SDTrimSP 5.07. Сравнение проведено с применением для вычисления поверхностной энергии связи существующих непрерывной и дискретной моделей, а также предложенной дискретно-непрерывной модели. Наилучшее согласие расчетных и экспериментальных данных достигнуто для дискретно-непрерывной модели, позволившей получить $\langle C_{\text{Ga}} \rangle = 30$ ат. % и $Y = 2,57$, а также физически адекватные значения поверхностной энергии связи путем варьирования двух подгоночных параметров. Эффективность дискретно-непрерывной модели обусловлена тем, что в ней учитывается слабое химическое взаимодействие атомов образца и ионного пучка друг с другом, а также образование преципитатов имплантированного галлия в облученном карбиде кремния.

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

Благодарности: авторы выражают благодарность М. Rommel из Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology IISB за предоставленные для исследования образцы карбида кремния, облученные ионами галлия.

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

Для цитирования: Румянцев А. В., Подорожний О. В., Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Моделирование процесса распыления карбида кремния фокусированным пучком ионов галлия // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 463–474. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-463-474>

Original article

Simulation of silicon carbide sputtering by gallium focused ion beam

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

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

lemi@miee.ru

Abstract. Precise fabrication of micro- and nanostructures is substantially facilitated by performing simulations of material sputtering by accelerated ions. Monte Carlo simulation is one of the most widely used approaches for such calculations and its correct application requires reliable data on the surface binding energy (SBE) of the substrate atoms. In this work, to obtain such data for silicon carbide the test structures of rectangular areas irradiated with the ion dose of 10^{17} cm^{-2} were experimentally prepared. Their cross sections were studied by transmission electron microscopy and energy-dispersive X-ray microanalysis. The average value of the gallium concentration $\langle C_{\text{Ga}} \rangle_{\text{exp}} = 25 \text{ at. \%}$ in the vicinity of its maximum was obtained. This quantity together with the known sputtering yield value $Y_{\text{exp}} = 2.1$ were quantitatively compared applying the *R*-factor with the results of simulations performed by the SDTrimSP 5.07 software package. Standard continuous and discrete variation models, as well as the proposed discrete-continuous variation model were employed for calculating SBE. The best agreement between the calculated and experimental data has been achieved for the discrete-continuous model that allowed obtaining $\langle C_{\text{Ga}} \rangle = 30 \text{ at. \%}$ and $Y = 2.57$, as well as providing physically adequate SBE values by varying two fitting parameters. The efficiency of this model results from consideration of the weak chemical interaction between substrate and ion beam atoms, as well as the formation of precipitates of implanted gallium in irradiated silicon carbide.

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

Acknowledgments: the authors express their gratitude to M. Rommel from Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology IISB for providing the ion irradiated samples for investigation.

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

For citation: Rumyantsev A. V., Podorozhniy O. V., Volkov R. L., Borgardt N. I. Simulation of silicon carbide sputtering by gallium focused ion beam. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 463–474. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-463-474>

Введение. Метод фокусированного ионного пучка (ФИП) позволяет проводить прецизионное формование, модификацию и анализ микро- и наноструктур. Он успешно применяется в современных нанотехнологиях, а также в микро- и наноэлектронике, в том числе при контроле технологических процессов и для анализа и модификации интегральных микросхем. Отдельной областью приложения метода ФИП является наноструктурирование поверхности и прототипирование устройств для использования в электронике, фотонике и смежных областях. Эффективность применения ФИП для решения многих задач связана с детальным изучением и моделированием взаимодействия ускоренных ионов с технологически важными материалами, значительная часть которых бинарные. Например, карбид кремния SiC, на котором выполняется безмасочная литография методом ФИП, перспективен для различных приложений [1], в том числе для создания метаповерхностей, используемых в сенсорике [2], изготовления структур для применения в оптике [3, 4], формирования нанопор для биологических приложений [5].

Существенным препятствием для проведения прецизионной ионной обработки SiC являются высокие значения его атомной плотности и поверхностной энергии связи (ПЭС) атомов. Сложность такой обработки стимулировала ряд исследований взаимодействия фокусированного пучка ионов галлия с SiC, направленных на формирование гладкой поверхности [1], изучение распределения дефектов в подложке при воздействии ФИП при анализе микросхем [6], сравнение воздействия ионной бомбардировки на SiC и монокристаллический кремний [7]. Отметим также, что, помимо ионов галлия, всесторонне изучалось взаимодействие легких ускоренных ионов с SiC, так как он применяется в качестве конструкционного материала при создании ядерных реакторов [8].

Для моделирования распыления материалов ионными пучками используют метод Монте-Карло в приближении бинарных столкновений [9]. В частности, в [1, 10] рассмотрено распыление SiC ионами галлия, в [11] – ионами легких элементов, а в [12–14] – ионами благородных газов. Во всех перечисленных работах отмечено, что корректность результатов вычислений существенным образом зависит от выбора значений ПЭС, которые определяют энергию, необходимую для удаления атомов материала с поверхности облучаемого образца, и являются входными параметрами при моделировании. Альтернативой модели ПЭС является подход, основанный на использовании объемных энергий связи [15], однако он не реализован в доступных программных пакетах. Если для простых веществ использование энергии сублимации или когезионной энергии в качестве значений ПЭС приводит к удовлетворительным результатам, то в случае многокомпонентных мишеней универсальный подход для определения ПЭС еще не разработан [16].

Для нахождения ПЭС при ионной бомбардировке SiC предлагаются различные подходы. Так, в [1] изучено распыление SiC ионами галлия и золота и показано, что адекватных результатов моделирования можно достичь только при поверхностной энергии связи, равной 2,1 эВ. Это значительно меньше энергии диссоциации связи Si–C, равной 7 эВ. В [13, 14] рассмотрена бомбардировка SiC ионами благородных газов, энергии связи атомов Si и C выбраны равными соответствующим энергиям сублимации 4,7 и 7,4 эВ, а также среднему значению данных энергий, равному 6,05 эВ. Ни один из перечисленных вариантов не обеспечивает удовлетворительного согласия рас-

четных и экспериментальных значений концентраций элементов в приповерхностной области образца.

В настоящей работе изучается влияние выбора модели поверхностной энергии связи на результаты расчетов взаимодействия ионов галлия с SiC методом Монте-Карло. Вычисленные значения коэффициента распыления и средней концентрации галлия в окрестности ее пикового значения сравниваются с экспериментальными данными, полученными методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа на основе изучения сформированных с применением ФИП углублений.

Экспериментальные исследования тестовых структур. Распыление монокристаллического карбида кремния 4H-SiC *n*-типа, легированного азотом с концентрацией примеси в диапазоне $0,8 \cdot 10^{19} - 2,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, осуществляли в электронно-ионном микроскопе FEI Helios Nanolab 600 при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе пучка 1,5 пА путем формирования углублений с размерами $1 \times 5 \text{ мкм}$ ионами галлия с дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. В облученной области методом *in situ* lift-out [17] приготавливали образец поперечного сечения в виде тонкой фольги, который исследовали в просвечивающем электронном микроскопе Titan Themis 200 при ускоряющем напряжении 200 кВ методами высоко-разрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВРЭМ), просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа.

На рис. 1, *a* представлена электронно-микроскопическая микрофотография части образца, а на рис. 1, *б, в* показаны увеличенные ВРЭМ- и ПРЭМ-изображения области, обведенной пунктиром на рис. 1, *a*. На микрофотографиях аморфизованный при облучении SiC и кристаллический SiC визуализируются как светлые и темные области соответственно. Отметим, что структура аморфизованного слоя детально изучена методами просвечивающей электронной микроскопии для случая ионной бомбардировки монокристаллического кремния [18, 19].

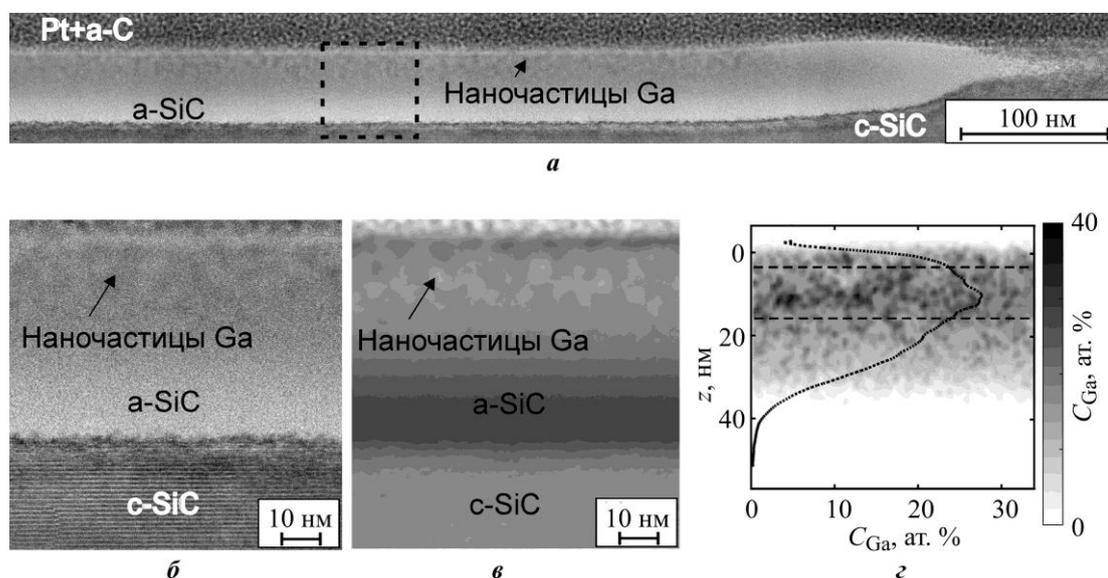


Рис. 1. Электронно-микроскопическая микрофотография поперечного сечения облученного образца SiC (*a*), увеличенные ВРЭМ- и ПРЭМ-изображения области (*б, в* соответственно), ограниченной пунктиром на рис. 1, *a*, и карта химического микроанализа (*г*)

Fig. 1. High resolution cross-sectional image of the irradiated SiC sample (*a*), enlarged HRTEM and STEM images of the area (*b, c* respectively) enclosed by the dotted square in Fig. 1, *a*, and chemical microanalysis map (*d*)

Как видно из рис. 1, *a–в*, в приповерхностной области образца после облучения образуются наночастицы галлия со средним размером около 3,5 нм. Двумерное распределение (карта) атомов галлия, полученное методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа для этого же образца, и профиль концентрации галлия по глубине $C_{\text{Ga}}(z)$, который определяли путем усреднения карты в направлении, параллельном поверхности образца, показаны на рис. 1, *г*. Далее аналогично описанному в [20] подходу вычисляли среднюю концентрацию галлия $\langle C_{\text{Ga}} \rangle_3$ в области, включающей в себя ее пиковое значение и ограниченной штриховыми линиями на рис. 1. Найденное значение $\langle C_{\text{Ga}} \rangle_3 = 25$ ат. % несколько выше установленной в работе [6] концентрации галлия в окрестности ее пикового значения, приблизительно равного 20 ат. %.

Моделирование ионной бомбардировки. Моделирование методом Монте-Карло выполняли с помощью программного пакета SDTrimSP 5.07 [21], специально разработанного для изучения процесса распыления. Вычисления проводили в динамическом режиме с использованием потенциала взаимодействия КГС и с учетом накопления галлия в образце. Доза ионов составляла 10^{17} см⁻², число траекторий 30 000. Для определения концентрации имплантированной примеси образец толщиной 200 нм разделяли на 400 равных слоев. При достижении заданной дозы ионов коэффициент распыления имплантированных атомов близок к единице, что свидетельствует об установившемся режиме распыления.

Для моделирования распыления бинарного вещества SiC методом Монте-Карло необходимо определить поверхностные энергии связи U_{Si} , U_{C} и U_{Ga} атомов Si, C и Ga. В пакете SDTrimSP эти энергии находятся на основе так называемой непрерывной модели (Continuous Variation Model, CVM):

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

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

$$U_{\text{Ga}} = U_{\text{Ga-Si}}C_{\text{Si}} + U_{\text{Ga-C}}C_{\text{C}} + U_{\text{Ga-Ga}}C_{\text{Ga}}, \quad (3)$$

где C_{Si} , C_{C} , C_{Ga} – концентрации атомов Si, C и Ga; $U_{\text{Si-Si}}$, $U_{\text{C-C}}$ и $U_{\text{Ga-Ga}}$ – поверхностные энергии связи Si, C, Ga в химически чистых веществах; $U_{\text{X-Y}}$ – энергия связи атомов сорта X, окруженных атомами сорта Y.

Как видно из выражений (1)–(3), совокупность всех энергий связи образует матрицу размером 3×3, называемую матрицей ПЭС. Получаемые при различных значениях матрицы ПЭС коэффициент распыления Y и среднюю концентрацию имплантированного галлия $\langle C_{\text{Ga}} \rangle$ в окрестности ее максимального значения сравнивали с соответствующими экспериментальными значениями: $Y_3 = 2,1$ [7] и $\langle C_{\text{Ga}} \rangle_3 = 25$ ат. % (см. рис. 1, *г*) с использованием R -фактора:

$$R = \frac{(Y - Y_3)^2}{Y_3^2} + \frac{(\langle C_{\text{Ga}} \rangle - \langle C_{\text{Ga}} \rangle_3)^2}{\langle C_{\text{Ga}} \rangle_3^2}. \quad (4)$$

Для расчетов в рамках CVM диагональные элементы матрицы ПЭС выбирали равными энергиям сублимации химически чистых элементов: $U_{\text{Si-Si}} = 4,7$ эВ, $U_{\text{C-C}} = 7,4$ эВ, $U_{\text{Ga-Ga}} = 2,8$ эВ [22]. Поскольку данные для недиагональных элементов матрицы ПЭС

отсутствуют, использовали часто применяемое эмпирическое правило, согласно которому значения этих элементов вычисляли как среднеарифметическое энергий связи химически чистых элементов [21]. В результате моделирования (таблица) получили сравнительно большое значение R -фактора, что свидетельствует о неприменимости SVM для описания распыления SiC ионами Ga^+ , поскольку в этой модели не учитывается, что в SiC атомы кремния в основном взаимодействуют с атомами углерода.

Результаты расчетов с использованием различных моделей
(экспериментальные значения: $Y_s = 2,1$ ат./ион, $\langle C_{Ga} \rangle = (25 \pm 2)$ ат. %)

Simulation results obtained using different models
(experimental values: $Y_{exp} = 2.1$ ат./ион, $\langle C_{Ga} \rangle = (25 \pm 2)$ ат. %)

Модель	U_{SiC} , эВ	α_1	Y , ат./ион	$\langle C_{Ga} \rangle$, ат. %	R
DVM	–	–	2,07	43	0,52
SVM	6,1	–	2,46	39	0,39
DCVM	$5,0 \pm 0,1$	$0,99 \pm 0,01$	$2,57 \pm 0,02$	30 ± 1	$0,10 \pm 0,01$
SVM*	5,44	–	2,46	30	0,08

* Моделирование с применением эволюционного алгоритма.

Помимо SVM программный пакет SDTrimSP позволяет непосредственно реализовать дискретную модель (Discrete Variation Model, DVM), в рамках которой энергия связи между атомами не зависит от концентрации элементов и принимается равной энергии связи химически чистых веществ. Хотя применение DVM для распыления SiC не является обоснованным, поскольку в приповерхностной области образца не образуются фазы кремния, углерода и галлия, эта модель также апробирована при таких же значениях энергий связи, как в непрерывной модели. Как видно из таблицы, использование DVM привело к большому значению R -фактора и не позволило получить адекватные результаты моделирования.

Помимо описанных стандартных подходов с использованием выражений (1)–(3) для вычисления энергий связи можно реализовать дискретно-непрерывную модель (Discrete-Continuous Variation Model, DCVM), предложенную для моделирования распыления монокристаллического кремния ионами галлия в работе [23]. Аналогично [23] целесообразность использования DCVM при описании распыления SiC обусловлена двумя факторами: слабым химическим взаимодействием атомов образца и ионного пучка друг с другом ($U_{Si-Ga} \approx U_{Ga-Si} \approx U_{C-Ga} \approx U_{Ga-C} \approx 0$) и образованием преципитатов имплантированного Ga в подложке, которые выявлены в работе [6] и непосредственно визуализированы на рис. 1, б, в.

Для построения модели учтем, что согласно экспериментальным данным при ионной бомбардировке преобладающим межатомным взаимодействием как в кристаллическом, так и в аморфизованном SiC являются связи между атомами Si и C [24]. Поэтому для нахождения U_{Si} в распыляемом SiC можно не основываться на выражении (1), а ввести энергию U_{SiC} . Она определяется как энергия, которая необходима для удаления атомов кремния из химически чистого SiC, находящегося в кристаллическом или аморфном состоянии. При этом $U_{Si} = U_{SiC}$. Поскольку при распылении SiC ионным пучком в нем появляются атомы галлия, образующие преципитаты, то энергия связи U_{Si} уменьшается, что можно учесть, если ввести некоторую функцию $\alpha(C_{Si}, C_C) \leq 1$ и представить U_{Si} в виде

$$U_{Si} = \alpha(C_{Si}, C_C) U_{SiC}. \quad (5)$$

Полагая, что введенную функцию $\alpha(C_{Si}, C_C)$ можно применить и для нахождения энергии связи атомов углерода, получаем

$$U_C = \alpha(C_{Si}, C_C)U_{SiC}. \quad (6)$$

Вследствие образования преципитатов галлия их распыление ионным пучком в SiC происходит так же, как в химически чистом веществе, и поэтому для вычисления энергии связи U_{Ga} вместо формулы (3) можно основываться на соотношении

$$U_{Ga} = U_{Ga-Ga}. \quad (7)$$

Представляя $\alpha(C_{Si}, C_C)$ в виде ряда Тейлора в окрестности точки $C_{Si} = C_C = C_0 = 0,5$ и ограничиваясь постоянными и линейными слагаемыми, имеем

$$\alpha(C_{Si}, C_C) = 1 - \alpha_{Si}(C_0 - C_{Si}) - \alpha_C(C_0 - C_C), \quad (8)$$

где $\alpha_{Si} = \partial\alpha/\partial C_{Si}|_{C_0}$, $\alpha_C = \partial\alpha/\partial C_C|_{C_0}$.

Предполагая для простоты, что уменьшение энергий связи U_{Si} и U_C при имплантации Ga в SiC происходит одинаково, будем считать $\alpha_{Si} = \alpha_C = \alpha_1$.

Для реализации DCVM в программном пакете SDTrimSP формулы (1) и (2) для энергий связи U_{Si} и U_{Ga} представляются в виде

$$U_{Si} = U_{SiC}C_{Si} + U_{SiC}C_C + (1 - \alpha_1)U_{SiC}C_{Ga}, \quad (9)$$

$$U_C = U_{SiC}C_{Si} + U_{SiC}C_C + (1 - \alpha_1)U_{SiC}C_{Ga}, \quad (10)$$

а формула (3) для U_{Ga} сводится к (7) при выборе $U_{Ga-Si} = U_{Ga-C} = U_{Ga-Ga}$, поскольку $C_{Si} + C_C + C_{Ga} = 1$.

Отметим, что введенная в DCVM функция $\alpha(C_{Si}, C_C)$ дает возможность получить с ростом концентрации имплантированного Ga более медленное убывание энергий связи U_{Si} и U_C , чем в SVM, в рамках которой можно реализовать только предельный случай $\alpha(C_{Si}, C_C) = 1$ при формальном выборе $U_{Si-C} = U_{C-Si} = U_{SiC}$ и $U_{Ga-Si} = U_{Ga-C} = 0$. При выборе $\alpha(C_{Si}, C_C) = 0$ из выражений (9), (10) видно, что $U_{Si} = U_C = U_{SiC}$ и, следовательно, реализуется дискретная модель.

Выражения (7), (9) и (10) позволили выполнить моделирование распыления SiC в программном пакете SDTrimSP для определения оптимальных значений U_{SiC} и α_1 . Для этого в автоматизированном режиме U_{SiC} изменяли в пределах 0–10 эВ с шагом 0,5 эВ, а α_1 варьировали от 0 до 1,0 с шагом 0,1 и для каждой пары возможных значений U_{SiC} и α_1 вычисляли Y и C_{Ga} . Далее на основе выражения (4) находили R -фактор. Его двумерное распределение, построенное в программном пакете Matlab, приведено на рис. 2, из которого следует, что на R -фактор в большей степени влияет значение энергии связи U_{SiC} , а вариация параметра α_1 приводит лишь к незначительным поправкам. Вблизи области минимальных значений R -фактора, отмеченной стрелкой на рис. 2, проводили дополнительные расчеты с варьированием U_{SiC} и α_1 с шагами 0,1 и 0,01 эВ соответственно. В таблице приведены результаты выполненных вычислений при оптимальных значениях U_{SiC} и α_1 .

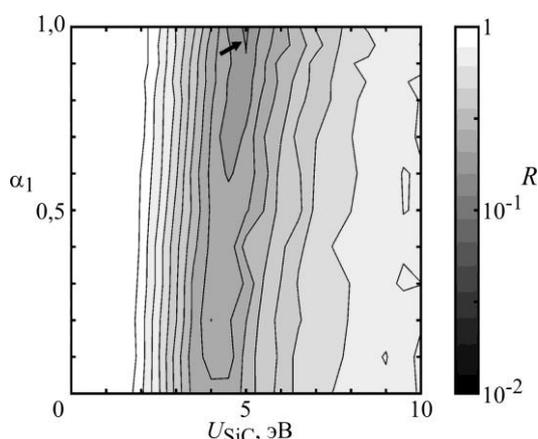


Рис. 2. Двумерное распределение R -фактора (стрелка указывает на его минимальное значение)

Fig. 2. Two-dimensional distribution of the R -factor value (the arrow points at the minimal value)

Использование DCVM позволило существенно уменьшить R -фактор (см. таблицу) и, следовательно, улучшить согласование результатов моделирования и экспериментальных данных, хотя различия между значениями Y и Y_3 , $\langle C_{Ga} \rangle$ и $\langle C_{Ga} \rangle_3$ остаются достаточно большими и составляют около 20%. Близкое к 1 значение параметра α_1 указывает на незначительное влияние преципитатов Ga, образующихся при распылении SiC, на изменение энергии связи между атомами Si и C. Это, по-видимому, обусловлено малым размером преципитатов. Преципитаты Ga, формирующиеся в Si в аналогичных условиях распыления, примерно в два раза больше, и влияние их образования на энергию связи заметно сильнее [23].

Поскольку при использовании всех апробированных моделей расчета энергии связи в бомбардируемом ионами галлия SiC различия между расчетными и экспериментальными данными достаточно большие, выполнено моделирование процесса распыления с формальным варьированием всех элементов матрицы ПЭС: U_{Si-Si} , U_{C-C} , U_{Ga-Ga} , $U_{Ga-Si} = U_{Si-Ga}$, $U_{Ga-C} = U_{C-Ga}$ и $U_{Si-C} = U_{C-Si}$. Поиск минимального значения R -фактора проводили с применением эволюционного алгоритма СМА-ES [25]. В таблице приведены результаты моделирования в рамках данного подхода (модель SVM*). Минимальное значение R -фактора достигалось при следующих значениях матрицы ПЭС: $U_{Si-Si} = 4,04$ эВ; $U_{C-C} = 7,59$ эВ; $U_{Ga-Ga} = 2,14$ эВ; $U_{Ga-Si} = U_{Si-Ga} = 0,20$ эВ; $U_{Ga-C} = U_{C-Ga} = 0,77$ эВ; $U_{Si-C} = U_{C-Si} = 5,44$ эВ. Как следует из таблицы, формальный подход, при котором варьируются шесть параметров, позволил несущественно улучшить согласие между расчетными и экспериментальными данными. Поскольку при таком подходе полученные значения матрицы ПЭС не допускают физической интерпретации, то его применение при моделировании распыления SiC ионами Ga нецелесообразно.

Для выявления других возможных причин различий результатов расчетов и эксперимента варьировали плотность аморфизованного SiC и имплантированного Ga в широком диапазоне значений. Это позволило незначительно уменьшить R -фактор. Вариация электронной тормозной способности также не оказала существенного влияния на результаты моделирования.

Таким образом, проведенные вычисления свидетельствуют о том, что применение дискретно-непрерывной модели является оптимальным подходом для моделирования распыления SiC ионами Ga в программном пакете SDTrimSP.

Заключение. Моделирование распыления SiC фокусированным пучком ионов Ga методом Монте-Карло с использованием предложенной дискретно-непрерывной модели для определения поверхностной энергии связи атомов обобщает на случай бинарных материалов ранее предложенный подход для описания взаимодействия ионов Ga с Si. Варьирование двух подгоночных параметров модели обеспечивает получение коэффициента распыления и средней концентрации атомов Ga в окрестности ее пикового зна-

чения, которые по сравнению со стандартными непрерывной и дискретной моделями лучше согласуются с экспериментальными значениями.

Дополнительные расчеты в рамках непрерывной модели, в которых формально варьировали шесть независимых элементов матрицы поверхностной энергии связи, позволили несколько улучшить согласие с экспериментальными данными, но привели к физически неадекватным значениям этих элементов.

Литература

1. Surface smoothing and patterning of SiC by focused ion beams / **R. Menzel, T. Bachmann, F. Machalett et al.** // Applied Surface Science. 1998. Vol. 136. Iss. 1–2. P. 1–7. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(98\)00333-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00333-X)
2. **Yang Y., Taylor S., Alshehri H., Wang L.** Wavelength-selective and diffuse infrared thermal emission mediated by magnetic polaritons from silicon carbide metasurfaces // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 111. Iss. 5. Art. No. 051904. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4996865>
3. Fabrication of nano-scale optical patterns in amorphous silicon carbide with focused ion beam writing / **T. Tsvetkova, S. Takahashi, A. Zayats et al.** // Vacuum. 2005. Vol. 79. Iss. 1–2. P. 100–105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.02.001>
4. Ion beam processing of SiC for optical application / **W. Wesch, A. Heft, R. Menzel et al.** // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1999. Vol. 148. Iss. 1–4. P. 545–550. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00826-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00826-X)
5. **Gierak J.** Focused Ion Beam nano-patterning from traditional applications to single ion implantation perspectives // Nanofabrication. 2014. Vol. 1. Iss. 1. P. 35–52. doi: <https://doi.org/10.2478/nanofab-2014-0004>
6. Detailed characterisation of focused ion beam induced lateral damage on silicon carbide samples by electrical scanning probe microscopy and transmission electron microscopy / **F. Stumpf, A. A. Abu Quba, P. Singer et al.** // Journal of Applied Physics. 2018. Vol. 123. Iss. 12. Art. No. 125104. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5022558>
7. Comparison of silicon and 4H silicon carbide patterning using focused ion beams / **S. K. P. Veerapandian, S. Beuer, M. Rumler et al.** // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. Vol. 365 (A). P. 44–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.079>
8. **Cowen B. J., El-Genk M. S.** Point defects production and energy thresholds for displacements in crystalline and amorphous SiC // Computational Materials Science. 2018. Vol. 151. P. 73–83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.04.063>
9. **Nordlund K.** Historical review of computer simulation of radiation effects in materials // Journal of Nuclear Materials. 2019. Vol. 520. P. 273–295. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.04.028>
10. **Menzel R., Bachmann T., Wesch W., Hobert H.** Maskless sub- μm patterning of silicon carbide using a focused ion beam in combination with wet chemical etching // Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1998. Vol. 16. Iss. 2. P. 540–543. doi: <https://doi.org/10.1116/1.589859>
11. **Plank H., Eckstein W.** Preferential sputtering of carbides under deuterium irradiation – a comparison between experiment and computer simulation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1997. Vol. 124. Iss. 1. P. 23–30. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(97\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(97)00113-4)
12. **Kosiba R., Ecke G.** MC simulations of depth profiling by low energy ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2002. Vol. 187. Iss. 1. P. 36–47. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00848-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00848-5)
13. **Kosiba R., Ecke G., Ambacher O., Menyhard M.** Sputtering of SiC with low energy He and Ar ions under grazing incidence // Radiation Effects and Defects in Solids. 2003. Vol. 158. Iss. 10. P. 721–730. doi: <https://doi.org/10.1080/10420150310001599180>
14. The estimation of sputtering yields for SiC and Si / **G. Ecke, R. Kosiba, V. Kharlamov et al.** // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2002. Vol. 196. Iss. 1–2. P. 39–50. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01273-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01273-9)
15. **Hofsäss H., Stegmaier A.** Binary collision approximation simulations of ion solid interaction without the concept of surface binding energies // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:

Beam Interactions with Materials and Atoms. 2022. Vol. 517. P. 49–62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.02.012>

16. **Malherbe J. B.** Sputtering of compound semiconductor surfaces. I. Ion-solid interactions and sputtering yields // *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*. 1994. Vol. 19. Iss. 2. P. 55–127. doi: <https://doi.org/10.1080/10408439408244588>

17. **Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J.** TEM sample preparation and FIB-induced damage // *MRS Bulletin*. 2007. Vol. 32. Iss. 5. P. 400–407. doi: <https://doi.org/10.1557/mrs2007.63>

18. Si amorphization by focused ion beam milling: Point defect model with dynamic BCA simulation and experimental validation / **J. Huang, M. Loeffler, U. Muehle et al.** // *Ultramicroscopy*. 2018. Vol. 184 (B). P. 52–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2017.10.011>

19. **Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Prikhodko A. S., Chaplygin Yu. A.** Characterizing interface structure between crystalline and ion bombarded silicon by transmission electron microscopy and molecular dynamics simulations // *Applied Surface Science*. 2021. Vol. 540 (1). Art. No. 148278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148278>

20. **Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Volkov R. L.** Simulation of redeposited silicon sputtering under focused ion beam irradiation // *J. Synch. Investig.* 2018. Vol. 12. Iss. 3. P. 607–612. doi: <https://doi.org/10.1134/S1027451018030345>

21. SDTrimSP version 5.05 / **A. Mutzke, R. Schneider, W. Eckstein et al.** Garching: IPP, 2015. 70 p.

22. **Eckstein W.** Computer simulation of ion-solid interactions. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. XI, 296 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73513-4>

23. **Borgardt N. I., Rumyantsev A. V., Volkov R. L., Chaplygin Yu. A.** Sputtering of redeposited material in focused ion beam silicon processing // *Mater. Res. Express*. 2018. Vol. 5. No. 2. Art. No. 025905. doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1>

24. Behavior of Si and C atoms in ion amorphized SiC / **W. Jiang, Y. Zhang, M. H. Engelhard et al.** // *Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 101. Iss. 2. Art. No. 023524. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2431941>

25. **Hansen N.** The CMA evolution strategy: A comparing review // *Towards a New Evolutionary Computation* / eds J. A. Lozano, P. Larrañaga, I. Inza, E. Bengoetxea. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. P. 75–102. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-32494-1_4

Статья поступила в редакцию 29.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.05.2022 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторах

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

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

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

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

References

1. Menzel R., Bachmann T., Machalett F., Wesch W., Lang U., Wendt M., Musil C., Mühle R. Surface smoothing and patterning of SiC by focused ion beams. *Applied Surface Science*, 1998, vol. 136, iss. 1–2, pp. 1–7. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(98\)00333-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00333-X)
2. Yang Y., Taylor S., Alshehri H., Wang L. Wavelength-selective and diffuse infrared thermal emission mediated by magnetic polaritons from silicon carbide metasurfaces. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 111, iss. 5, art. no. 051904. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4996865>
3. Tsvetkova T., Takahashi S., Zayats A., Dawson P., Turner R., Bischoff L., Angelov O., Dimova-Malinovska D. Fabrication of nano-scale optical patterns in amorphous silicon carbide with focused ion beam writing. *Vacuum*, 2005, vol. 79, iss. 1–2, pp. 100–105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.02.001>
4. Wesch W., Heft A., Menzel R., Bachmann T., Peiter G., Hobert H., Höche T., Dannberg P., Bräuer A. Ion beam processing of SiC for optical application. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, vol. 148, iss. 1–4, pp. 545–550. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00826-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00826-X)
5. Gierak J. Focused Ion Beam nano-patterning from traditional applications to single ion implantation perspectives. *Nanofabrication*, 2014, vol. 1, iss. 1, pp. 35–52. doi: <https://doi.org/10.2478/nanofab-2014-0004>
6. Stumpf F., Abu Quba A. A., Singer P., Rumler M., Cherkashin N., Schamm-Chardon S., Cours R., Rommel M. Detailed characterisation of focused ion beam induced lateral damage on silicon carbide samples by electrical scanning probe microscopy and transmission electron microscopy. *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, iss. 12, art. no. 125104. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5022558>
7. Veerapandian S. K. P., Beuer S., Rumler M., Stumpf F., Thomas K., Pillatsch L., Michler J., Frey L., Rommel M. Comparison of silicon and 4H silicon carbide patterning using focused ion beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, vol. 365 (A), pp. 44–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.079>
8. Cowen B. J., El-Genk M. S. Point defects production and energy thresholds for displacements in crystalline and amorphous SiC. *Computational Materials Science*, 2018, vol. 151, pp. 73–83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.04.063>
9. Nordlund K. Historical review of computer simulation of radiation effects in materials. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 520, pp. 273–295. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.04.028>
10. Menzel R., Bachmann T., Wesch W., Hobert H. Maskless sub- μm patterning of silicon carbide using a focused ion beam in combination with wet chemical etching. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1998, vol. 16, iss. 2, pp. 540–543. doi: <https://doi.org/10.1116/1.589859>
11. Plank H., Eckstein W. Preferential sputtering of carbides under deuterium irradiation – a comparison between experiment and computer simulation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1997, vol. 124, iss. 1, pp. 23–30. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(97\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(97)00113-4)
12. Kosiba R., Ecke G. MC simulations of depth profiling by low energy ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, vol. 187, iss. 1, pp. 36–47. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00848-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00848-5)
13. Kosiba R., Ecke G., Ambacher O., Menyhard M. Sputtering of SiC with low energy He and Ar ions under grazing incidence. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2003, vol. 158, iss. 10, pp. 721–730. doi: <https://doi.org/10.1080/10420150310001599180>
14. Ecke G., Kosiba R., Kharlamov V., Trushin Y., Pezoldt J. The estimation of sputtering yields for SiC and Si. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, vol. 196, iss. 1–2, pp. 39–50. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01273-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01273-9)
15. Hofsäss H., Stegmaier A. Binary collision approximation simulations of ion solid interaction without the concept of surface binding energies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2022, vol. 517, pp. 49–62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.02.012>
16. Malherbe J. B. Sputtering of compound semiconductor surfaces. I. Ion-solid interactions and sputtering yields. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 1994, vol. 19, iss. 2, pp. 55–127. doi: <https://doi.org/10.1080/10408439408244588>
17. Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J. TEM sample preparation and FIB-induced damage. *MRS Bulletin*, 2007, vol. 32, iss. 5, pp. 400–407. doi: <https://doi.org/10.1557/mrs2007.63>

18. Huang J., Loeffler M., Muehle U., Moeller W., Mulders J. J. L., Kwakman L. F. Tz., Dorp W. F. van, Zschech E. Si amorphization by focused ion beam milling: Point defect model with dynamic BCA simulation and experimental validation. *Ultramicroscopy*, 2018, vol. 184 (B), pp. 52–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2017.10.011>
19. Rummyantsev A. V., Borgardt N. I., Prikhodko A. S., Chaplygin Yu. A. Characterizing interface structure between crystalline and ion bombarded silicon by transmission electron microscopy and molecular dynamics simulations. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 540 (1), art. no. 148278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148278>
20. Rummyantsev A. V., Borgardt N. I., Volkov R. L. Simulation of redeposited silicon sputtering under focused ion beam irradiation. *J. Synch. Investig.*, 2018, vol. 12, iss. 3, pp. 607–612. doi: <https://doi.org/10.1134/S1027451018030345>
21. Mutzke A., Schneider R., Eckstein W., Dohmen R., Schmid K., Toussaint U. V., Badelow G. *SDTrimSP version 5.05*. Garching, IPP, 2015. 70 p.
22. Eckstein W. *Computer simulation of ion-solid interactions*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013. xi, 296 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73513-4>
23. Borgardt N. I., Rummyantsev A. V., Volkov R. L., Chaplygin Yu. A. Sputtering of redeposited material in focused ion beam silicon processing. *Mater. Res. Express*, 2018, vol. 5, no. 2, art. no. 025905. doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1>
24. Jiang W., Zhang Y., Engelhard M. H., Weber W. J., Exarhos G. J., Lian J., Ewing R. C. Behavior of Si and C atoms in ion amorphized SiC. *Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 101, iss. 2, art. no. 023524. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2431941>
25. Hansen N. The CMA evolution strategy: A comparing review. *Towards a New Evolutionary Computation*, eds J. A. Lozano, P. Larrañaga, I. Inza, E. Bengoetxea. Berlin, Heidelberg, Springer, 2006, pp. 75–102. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-32494-1_4

The article was submitted 29.04.2022; approved after reviewing 05.05.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the authors

Alexander V. Rummyantsev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Senior Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq. 1), lemi@miee.ru

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

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

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

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Научная статья
УДК 621.382.33

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488

Унифицированные схемотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем

О. В. Дворников¹, А. А. Павлючик², Н. Н. Прокопенко^{3,4},
В. А. Чеховский⁵, А. В. Куниц^{5,6}, В. Е. Чумаков³

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

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», г. Минск, Беларусь

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

⁴Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук, г. Москва, Россия

⁵Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

⁶Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь

prokopenko@sss.ru

Аннотация. В экспериментальной физике, аэрокосмической электронике и специальных измерительных приборах для обработки сигналов датчиков необходимы аналоговые микросхемы, сохраняющие работоспособность при температуре менее $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и воздействии проникающей радиации. Для этих задач перспективны арсенид-галлиевые микроэлектронные изделия, схемотехника которых находится на начальном этапе развития из-за существенных ограничений на типы применяемых элементов и их характеристики. В работе представлены унифицированные схемотехнические решения арсенид-галлиевых операционных усилителей, компараторов, повторителей напряжения на основе ограниченного количества $p-n-p$ -НВТ (Hetero Junction Bipolar Transistor), ДрНЕМТ (Double Channel Pseudo Morphic High Electron Mobility Transistor) и тонкопленочных резисторов. С учетом выполненных измерений создана модель ДрНЕМТ для среды LTspice. Основное внимание уделено разработке новых выходных каскадов аналоговых микросхем. Показано, что однокаскадный операционный усилитель, содержащий только ДрНЕМТ, обеспечивает усиление около $3 \cdot 10^5$ и диапазон максимального выходного напряжения $\pm 2\text{ В}$ при несимметричном биполярном напряжении питания $-3\text{ В} / 7\text{ В}$, а двухкаскадный операционный усилитель на основе ДрНЕМТ и $p-n-p$ -НВТ имеет усиление около 10^5 и диапазон максимального выходного напряжения $\pm 4\text{ В}$ при напряжении питания $\pm 5\text{ В}$. Предлагаемые схемотехнические решения рекомендуются для изготовления на арсенид-галлиевом базовом кристалле.

© О. В. Дворников, А. А. Павлючик, Н. Н. Прокопенко, В. А. Чеховский, А. В. Куниц, В. Е. Чумаков, 2022

Ключевые слова: биполярный транзистор с гетеропереходом, арсенид галлия, транзистор с высокой подвижностью электронов, операционный усилитель, компаратор, повторитель напряжения

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00637).

Для цитирования: Унифицированные схемотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем / О. В. Дворников, А. А. Павлючик, Н. Н. Прокопенко и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 475–488. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488>

Original article

Unified circuitry solutions for analog gallium-arsenide microcircuits

O. V. Dvornikov¹, A. A. Pavlyuchik², N. N. Prokopenko^{3,4},
V. A. Tchekhovskiy⁵, A. V. Kunts^{5,6}, V. E. Chumakov³

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

²“Minsk Research Institute of Radiomaterials” JSC, Minsk, Belarus

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

⁴Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Belarusian State University, Minsk, Belarus

⁶Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

prokopenko@sssu.ru

Abstract. In experimental physics, aerospace electronics and special measuring instruments, analog microcircuits that remain functional at temperatures below -60 °C and exposure to penetrating radiation are needed to process sensor signals. Arsenide-gallium microelectronic products are promising for these tasks, the circuitry of which is at an early stage of development due to significant limitations on the types of elements used and their characteristics. In this work, unified circuit solutions for arsenide gallium operational amplifiers, comparators, voltage repeaters based on a limited number of p-n-p-HBT (Hetero Junction Bipolar Transistor), DpHEMT (Double Channel Pseudo Morphic High Electron Mobility Transistor) and thin-film resistors have been developed. Based on the measurements performed, a DpHEMT model for the LTspice environment is created. The main attention is paid to the development of new output stages of analog microcircuits. It is shown that a single-stage operational amplifier containing only DpHEMT provides a gain of about $3 \cdot 10^3$ and a range of maximum output voltage ± 2 V with an unbalanced bipolar supply voltage of -3 V / 7 V, and a two-stage operational amplifier based on DpHEMT and p-n-p-HBT has a gain of about 10^5 and a range of maximum output voltage ± 4 V with a supply voltage ± 5 V. The proposed circuit designs are recommended for fabrication on an arsenide gallium base crystal.

Keywords: hetero junction bipolar transistor, gallium arsenide, high electron mobility transistor, operational amplifier, comparator, voltage follower

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

For citation: Dvornikov O. V., Pavlyuchik A. A., Prokopenko N. N., Tchekhovski V. A., Kunts A. V., Chumakov V. E. Unified circuitry solutions for analog gallium-arsenide microcircuits. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 475–488. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488>

Введение. Аналоговые интегральные микросхемы (ИМС), сохраняющие работоспособность при температуре менее $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и воздействии проникающей радиации, необходимы для применения в экспериментальной физике, аэрокосмической электронике, измерительной технике. Проектирование аналоговых ИМС для эксплуатации в ограниченной области температур и при воздействии невысоких уровней проникающей радиации обычно выполняется на кремниевых биполярных и полевых транзисторах, управляемых $p-n$ -переходом (Junction Field Effect Transistor, JFET) [1–3]. При этом экономическая эффективность серийного производства малых партий таких изделий обеспечивается за счет применения базовых кристаллов, различных конструкций, в том числе матричных и структурных [4, 5]. Однако для работы при температуре около $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высоком уровне проникающей радиации во многих случаях применяют ИМС, изготовленные на широкозонных полупроводниковых материалах, например на арсениде галлия GaAs [6–12].

Схемотехнический синтез арсенид-галлиевых аналоговых ИМС затруднен из-за ограниченной номенклатуры допустимых к применению активных интегральных элементов (как правило, используются FET с каналом n -типа) и допустимых сопротивлений резисторов. По этой причине разными коллективами выполнены работы по расширению номенклатуры активных GaAs-элементов, а именно формированию на одной подложке: FET и биполярных $n-p-n$ -транзисторов с гетеропереходом (Hetero Junction Bipolar Transistor, HBT) [13, 14]; $p-n-p$ -HBT с высоким усилением [15, 16]; $n-p-n$ -и $p-n-p$ -HBT [17]; $n-p-n$ -HBT и комплементарных FET [14].

На основе анализа требуемого уровня параметров аналоговых ИМС сделан вывод о применении в качестве активных элементов комплементарной пары в виде $p-n-p$ -HBT и DpHEMT (Double Channel Pseudo Morphic High Electron Mobility Transistor) и необходимости разработки технологического маршрута их изготовления на одной GaAs-подложке.

В настоящей работе рассматриваются унифицированные схемотехнические решения основных компонентов арсенид-галлиевых аналоговых ИМС, синтезированных на ограниченном количестве $p-n-p$ -HBT и DpHEMT и ориентированных на изготовление в виде базового кристалла.

Описание применяемых интегральных элементов. Для схемотехнического синтеза аналоговых ИМС выбраны следующие элементы: DpHEMT с шириной затвора $W = 100\text{ }\mu\text{m}$, $W = 10\text{ }\mu\text{m}$ и длиной $L = 0,2\text{ }\mu\text{m}$, $p-n-p$ -HBT, тонкопленочные резисторы по 5 кОм с поверхностным сопротивлением $250\text{ Ом}/\square$ и конденсаторы по 1 пФ со структурой металл – диэлектрик – металл и удельной емкостью $0,23\text{ фФ}/\mu\text{m}^2$. Такой набор элементов позволяет значительно улучшить характеристики аналоговых ИМС, в том числе:

– увеличить усиление входных каскадов и уменьшить уровень шумов, отнесенных к входу, за счет большой крутизны g_m DpHEMT при относительно малом токе стока I_D ;

- реализовать простые каскады сдвига уровня постоянного напряжения на $p-n-p$ -НВТ;
- увеличить диапазон рабочего напряжения усилительных каскадов и сделать возможным выполнение двухтактных выходных каскадов при одновременном использовании ДрНЕМТ и $p-n-p$ -НВТ;
- обеспечить проектирование малощумящих зарядочувствительных усилителей благодаря применению головного ДрНЕМТ с высоким отношением g_m к входной емкости C_{INP} .

Отказ от масштабирования W/L для ДрНЕМТ принят на основе результатов измерений ВАХ тестовых структур, которые выявили следующее.

1. Транзисторы ДрНЕМТ с $W/L=1000$ мкм/0,2 мкм подвержены самовозбуждению. ВАХ этих транзисторов невозможно зарегистрировать без применения фильтрующих цепей, расположенных максимально близко к выводам транзистора на кристалле. Однако в этом случае затруднительно точно идентифицировать Spice-параметры по результатам измерений.

2. Увеличение длины затвора ДрНЕМТ до 1 мкм не привело к резкому увеличению выходного малосигнального сопротивления.

3. Как следует из выходной ВАХ, в схеме с общим истоком транзистора с $W/L = 10$ мкм/0,2 мкм (рис. 1, а) ДрНЕМТ имеют две области ВАХ с резко различающимся выходным малосигнальным сопротивлением только при небольшом обратном напряжении затвор – исток $|V_{GS}| < 0,4$ В для напряжения отсечки $V_{TH} = -0,95$ В. Под напряжением отсечки понимается $V_{TH} = V_{GS}$ при токе стока $I_D = 1$ мкА и напряжении сток – исток $V_{DS} > |V_{TH}|$. При $|V_{GS}| > 0,6$ В ВАХ ДрНЕМТ имеет вид, подобный управляемому резистору, и эту область не рекомендуется применять в усилительных каскадах, так как она не обеспечит требуемого высокого усиления.

4. Последовательное (классическое каскадное) соединение двух одинаковых ДрНЕМТ (рис. 1, б) обеспечивает увеличение выходного малосигнального сопротивления, которого достаточно для большинства применений в аналоговых ИМС.

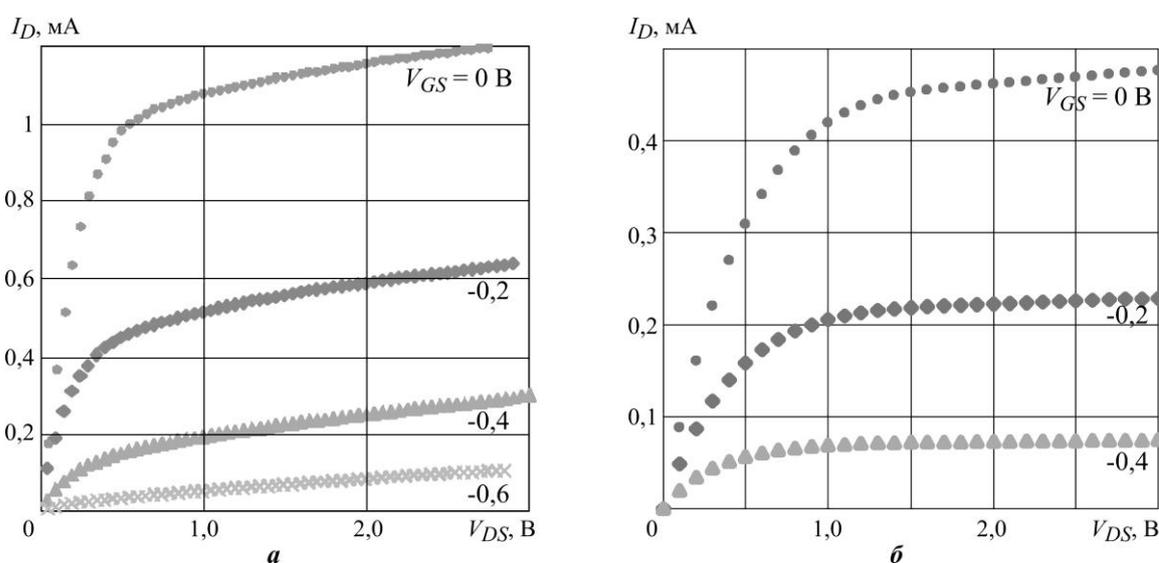


Рис. 1. Выходные ВАХ в схеме с общим истоком при разных V_{GS} ДрНЕМТ ($W/L = 10$ мкм/0,2 мкм):

а – отдельный транзистор; б – последовательное соединение двух транзисторов

Fig. 1. Output DpHEMT VAC in a circuit with a common source with different V_{GS}

($W/L = 10$ microns/0.2 microns): a – a separate transistor, b – a serial connection of two transistors

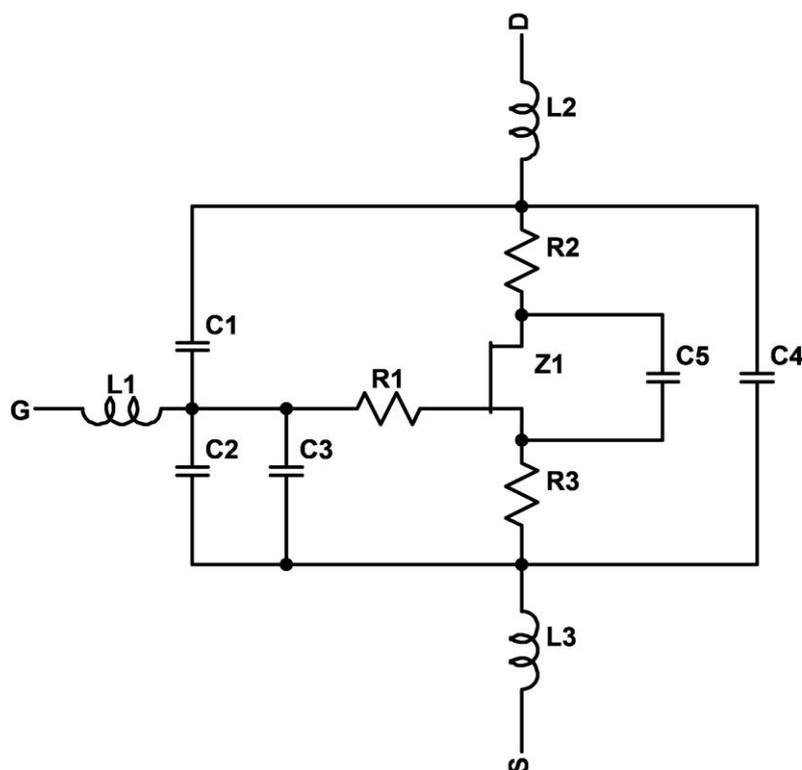


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема DpHEMT для LTSpice
Fig. 2. Equivalent DpHEMT electrical circuit for LTSpice

На основе выполненных измерений создана макромодель DpHEMT для программы LTSpice в виде подсхемы (рис. 2), параметры которой определены для области ВАХ $|V_{GS}| < 0,4$ В. Из-за отсутствия в настоящее время образцов $p-n-p$ -НВТ Spice-параметры его модели идентифицированы по результатам измерений, приведенных в работах [16, 17], и будут уточнены в дальнейшем. Результаты моделирования ВАХ $p-n-p$ -НВТ с применяемой при схемотехническом проектировании моделью показаны на рис. 3–5 [18].

Как следует из рис. 3 и 5, применяемая модель описывает $p-n-p$ -НВТ с относительно невысоким уровнем параметров, а именно наличием тока утечки между выводами коллектор – эмиттер около 1 мкА и малым β при эмиттерном токе менее 100 мкА. Поэтому можно предположить, что полученные результаты схемотехнического моделирования разработанных схем относятся к наихудшему случаю.

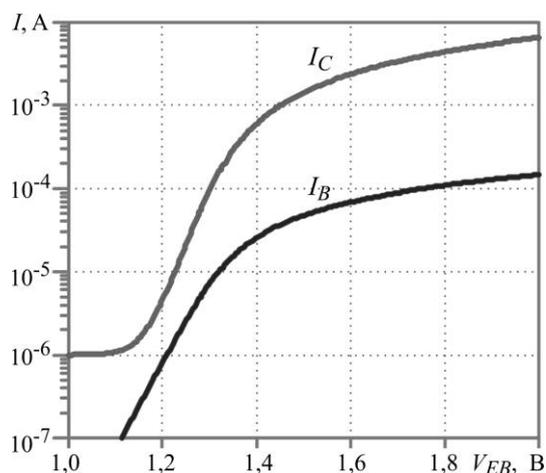


Рис. 3. Зависимость тока коллектора I_C и базы I_B $p-n-p$ -НВТ от напряжения эмиттер – база V_{EB} при $V_{CB} = 0$
Fig. 3. Dependence of collector current I_C and base current I_B $p-n-p$ HBT on emitter-base voltage V_{EB} at $V_{CB} = 0$

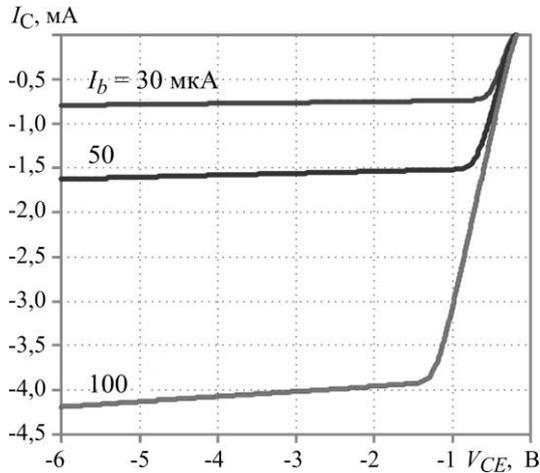


Рис. 4. Выходная ВАХ $p-n-p$ -НВТ в схеме с общим эмиттером
 Fig. 4. Output VAC of $p-n-p$ HBT in a circuit with a common emitter

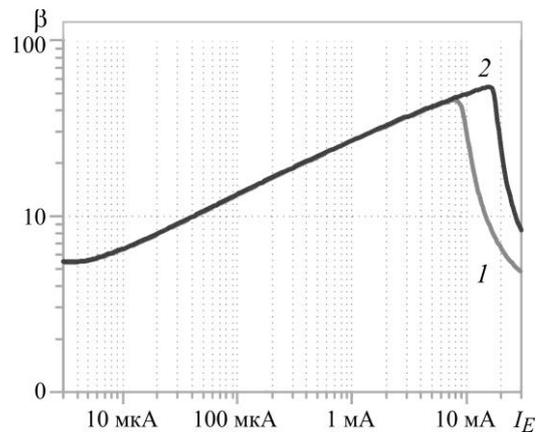


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления β базового тока $p-n-p$ -НВТ от эмиттерного тока I_E :
 $1 - V_{CB} = 0$; $2 - V_{CB} = -1$ В
 Fig. 5. Dependence of the base current gain β of the $p-n-p$ HBT on the emitter current I_E :
 $1 - V_{CB} = 0$; $2 - V_{CB} = -1$ В

Улучшение параметров электрических схем аналоговых компонентов. При схемотехническом синтезе за основу взяты ИМС, рассмотренные в [18]. Особое внимание уделено увеличению крутизны входных транзисторов за счет параллельного соединения нескольких транзисторов с $W/L = 100$ мкм/0,2 мкм; увеличению (при необходимости) выходного малосигнального сопротивления с применением последовательного соединения транзисторов с $W/L = 10$ мкм/0,2 мкм; введению симметричной активной нагрузки в дифференциальные каскады для обеспечения приемлемого значения напряжения смещения нуля V_{OFF} операционных усилителей без внешних корректирующих цепей.

В табл. 1 представлены результаты моделирования параметров, разработанные электрические схемы ИМС для программы LTSpice приведены на рис. 6.

Результаты схемотехнического моделирования операционных усилителей
 Таблица 1
 Table 1

Results of circuit modeling of the OAmPs

Параметр	Операционный усилитель		
	GaAs_OAmp1	GaAs_OAmp2	GaAs_OAmp3
Напряжение питания, В	-3/7	-5/5	-5/5
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	0,570	0,646	1,141
Напряжение смещения нуля, мВ	1,3	-0,19	-0,18
Коэффициент усиления напряжения	$2,9 \cdot 10^3$	10^5	10^5
Максимальное выходное напряжение при сопротивлении нагрузки $R_{LOAD} = 100$ кОм, В	-2,50/2,23	-4,41/4,52	-4,25/4,45
Частота единичного усиления, МГц	203*	52**	52**
Запас фазы при частоте единичного усиления, град	54*	54**	54**

* $C1 = 1,5$ пФ

** $C1 = 20$ пФ

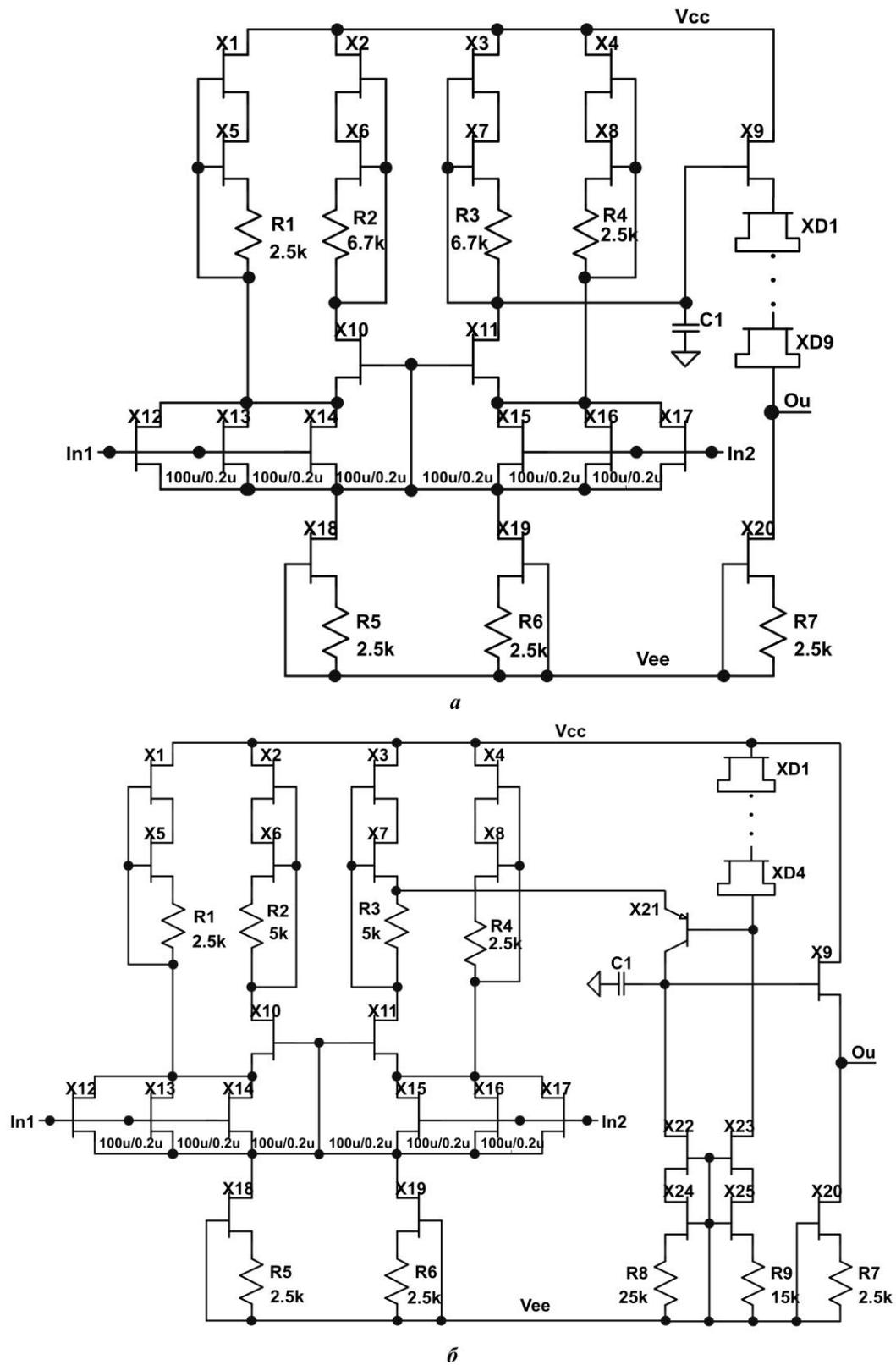


Рис. 6. Электрические схемы GaAs_OAmp1 (а), GaAs_OAmp2 (б)
 Fig. 6. Electrical circuits of GaAs_OAmp1 (а), GaAs_OAmp2 (б)

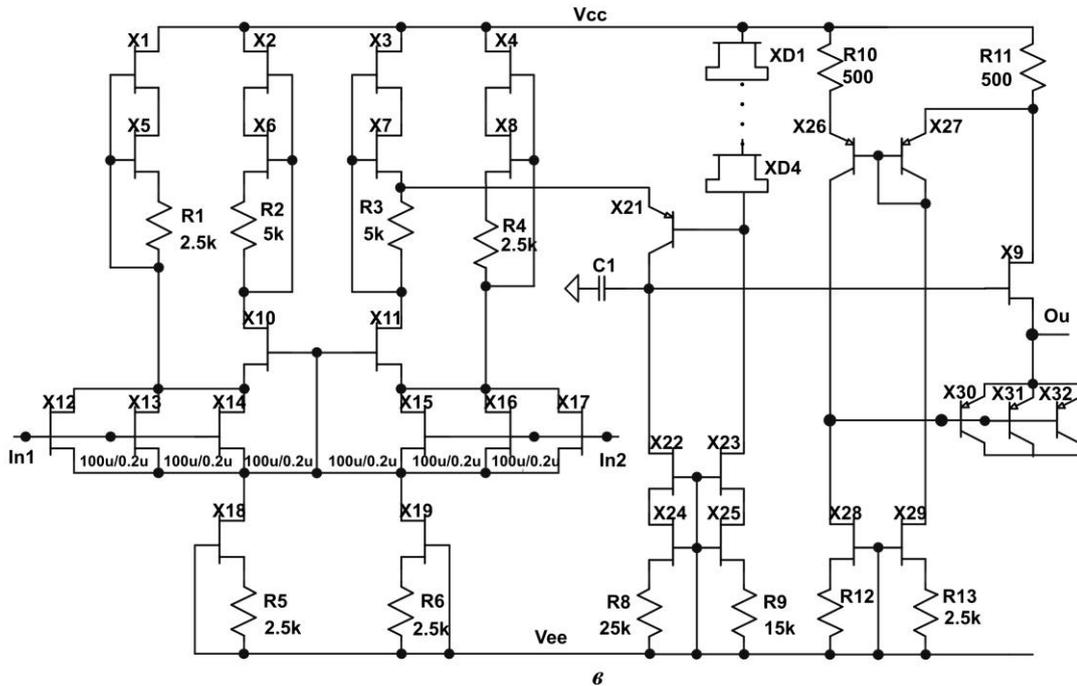


Рис. 6. Электрическая схема GaAs_OAmp3 (б)
Fig. 6. Electrical circuit of GaAs_OAmp3 (c)

Все ДрНЕМТ на электрических схемах имеют размер затвора $W/L = 10 \text{ мкм}/0,2 \text{ мкм}$, который на рисунках не указан. Размер затвора приведен только для ДрНЕМТ при $W/L = 100 \text{ мкм}/0,2 \text{ мкм}$. Требуемое значение сопротивления получено параллельно-последовательным соединением 5-кОм резисторов. Так, резистор R2 на рис. 6, а состоит из последовательного соединения одного 5-кОм резистора и трех параллельно соединенных 5-кОм резисторов.

Во всех операционных усилителях применен одинаковый дифференциальный каскад, состоящий из входных транзисторов с большой крутизной X12–X14 и X15–X17, каскодных транзисторов X10, X11, источников тока X18, R5 и X19, R6, нагрузки входных транзисторов X1, X5, R1 и X4, X8, R4, нагрузки каскодных транзисторов X2, X6, R2 и X3, X7, R3. Такое схемотехническое решение обычно применяется в каскодных JFET для обеспечения большого усиления напряжения [19]. Так, большая крутизна X12–X14 обеспечивается благодаря большому отношению W/L и значительной величине тока стока. В то же время большая часть постоянного тока стока транзисторов X12–X14 протекает через их нагрузку X1, X5, R1 в источник положительного напряжения V_{CC} , а меньшая часть – через X10, что позволяет включить в сток X10 большое нагрузочное сопротивление и увеличить усиление по напряжению. Отметим, что параметры элементов выбраны таким образом, что практически вся переменная составляющая тока стока X12–X14 протекает по низкому сопротивлению истока X10, а не по высокому сопротивлению нагрузки X1, X5, R1. На транзисторах X9, X20 с цепочкой последовательно соединенных диодов XD1–XD9 реализован выходной истоковый повторитель. Конденсатор C1 применен для коррекции амплитудно-частотной характеристики и получения требуемого запаса по фазе для заданного коэффициента усиления.

В GaAs_OAmp1 в качестве активных элементов применены только ДрНЕМТ, типовое значение напряжения отсечки которых составляет около -1 В , поэтому для обеспечения симметричного биполярного выходного напряжения используется несимметричное напряжение питания -3 В и $+7 \text{ В}$. Последний недостаток устранен в опера-

ционных усилителях GaAs_OAmp2, GaAs_OAmp3 (рис. 6, б, в), в которых для сдвига постоянного уровня и одновременного увеличения коэффициента усиления напряжения использован $p-n-p$ -НВТ X21, включенный по схеме с общей базой. Кроме того, в GaAs_OAmp3 предусмотрен двухтактный выходной каскад для работы с малым сопротивлением нагрузки R_{LOAD} . Усилитель GaAs_OAmp1 допустимо применять в качестве компаратора. В этом случае рекомендуется объединенные затворы X2, X6 соединять не со стоком X10, а со стоком X11. Таким образом реализуется цепь положительной обратной связи [20], почти в 2,2 раза увеличивающая коэффициент усиления по напряжению.

Особое внимание уделено разработке новых выходных каскадов (рис. 7) [21]. На рис. 7, а показан первоначально разработанный выходной каскад, примененный в GaAs_OAmp3. Отметим, что его использование значительно увеличивает ток потребления операционного усилителя. Для адекватного сравнения схем в модернизированном выходном каскаде (рис. 7, б) применено такое же количество НВТ, как и на рис. 7, а, а сопротивление резистора $R5$ выбрано таким образом, чтобы диапазон выходного напряжения каскадов при $R_{LOAD} = 2$ кОм был одинаковым. Как видно из табл. 2, ток потребления модернизированного выходного каскада (см. рис. 7, б) при указанных условиях почти в 4,1 раза меньше, чем ток первоначального каскада (см. рис. 7, а).

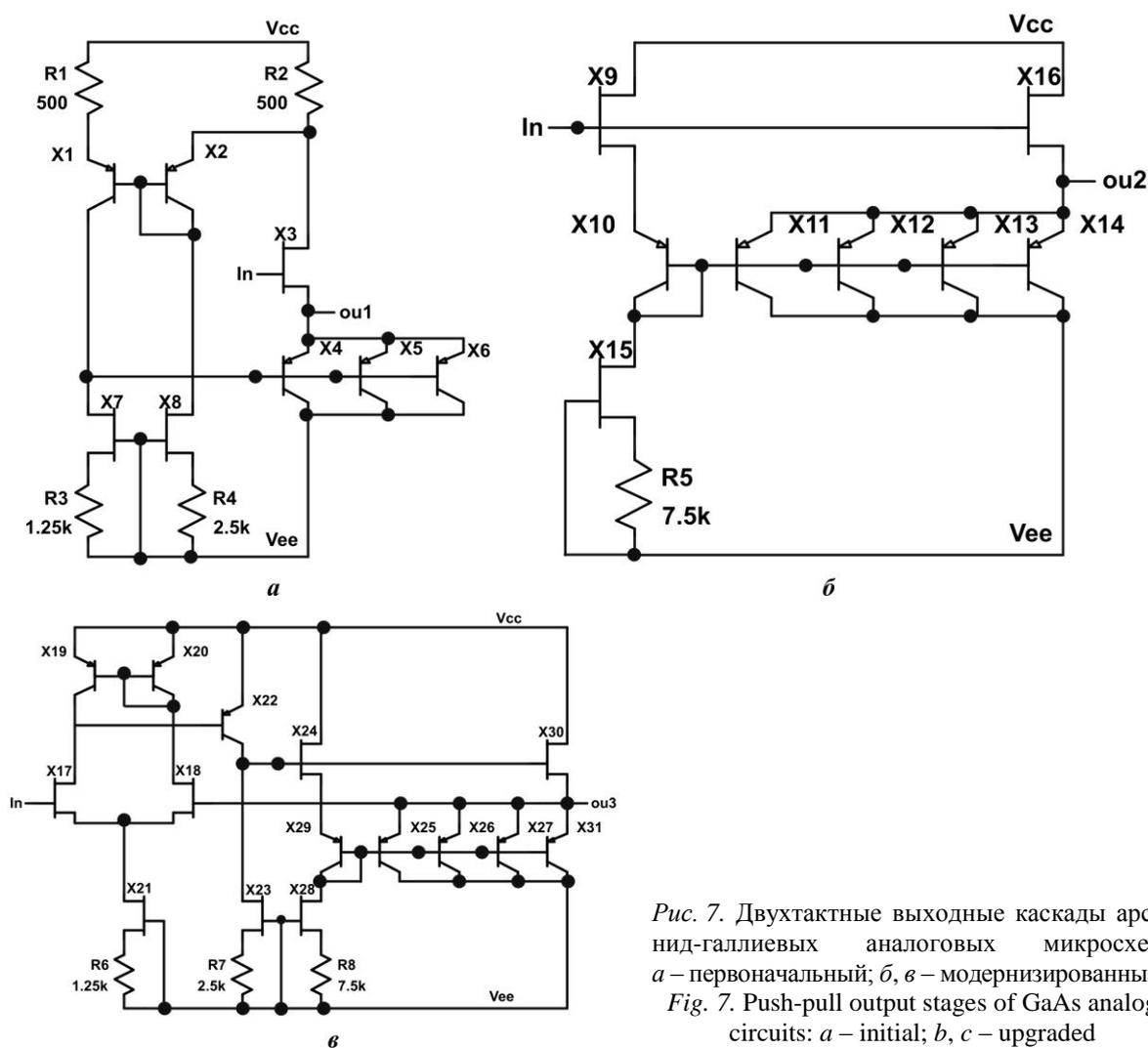


Рис. 7. Двухтактные выходные каскады арсенид-галлиевых аналоговых микросхем: а – первоначальный; б, в – модернизированные
 Fig. 7. Push-pull output stages of GaAs analog circuits: a – initial; b, c – upgraded

Таблица 2

Результаты схемотехнического моделирования выходных каскадов

Table 2

Results of circuit modeling of output stages

Параметр	Схема		
	рис. 7, а	рис. 7, б	рис. 7, в
Напряжение питания, В	-5/5	-5/5	-5/5
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	0,681	0,167	0,686
Максимальное выходное напряжение при $R_{LOAD} = 2$ кОм, В	-2,85/4,43	-2,76/4,47	-2,76/3,89
Диапазон изменения коэффициента передачи при изменении входного напряжения от -2,7 В до 2,7 В и $R_{LOAD} = 2$ кОм	от 0,737 до 0,946	от 0,766 до 0,910	от 0,997 до 0,998
Выходное напряжение при $V_{IN} = 0$ и $R_{LOAD} = 2$ кОм, мВ	-499,1	-565,2	-6,5

Постоянное выходное напряжение каскадов (см. рис. 7, а, б) не равно входному, а дифференциальный коэффициент передачи $K_D = \Delta V_{Ou} / \Delta V_{IN}$ зависит от уровня постоянного входного напряжения V_{IN} , т. е. от величины и направления тока, протекающего через нагрузочный резистор R_{LOAD} . Такая особенность выходных каскадов не является недостатком при их применении в операционных усилителях, в которых сдвиг выходного напряжения относительно входного в выходном каскаде обычно не вносит существенного вклада в V_{OFF} по сравнению с другими факторами (несимметричной нагрузкой во входном дифференциальном каскаде и влиянием схемы преобразования дифференциального сигнала в синфазный), а зависимость $K_D = f(V_{IN})$ выходного каскада компенсируется действием отрицательной обратной связи, охватывающей операционный усилитель.

Выходной каскад (см. рис. 7, в) рекомендуется для использования в качестве отдельного повторителя напряжения. В нем применен простой операционный усилитель (X17–X23), действие которого обеспечивает равенство потенциалов в узлах In и Ou3 (на входе и выходе повторителя напряжения) без зависимости от значения и направления тока, протекающего через нагрузку R_{LOAD} , подключаемую к узлу Ou3. К недостаткам такого повторителя можно отнести необходимость соединения коллектора X22 с конденсатором, обеспечивающим отсутствие самовозбуждения и увеличивающим площадь кристалла, занимаемую выходным каскадом.

Заключение. Для производства ИМС малой степени интеграции, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации, перспективны предлагаемые в статье унифицированные по номенклатуре, размерам применяемых $p-n-p$ -НВТ и DrHEMT, сопротивлениям используемых резисторов схемотехнические решения арсенид-галлиевых операционных усилителей, компараторов, повторителей напряжения. Рассмотренная схемотехника ИМС ориентирована на изготовление в виде специального базового кристалла, который содержит на одной подложке все сформированные активные и пассивные элементы, а реализация конкретных аналоговых схем с требуемым уровнем параметров осуществляется путем формирования двух уровней межсоединений.

Представленные результаты моделирования ИМС в среде LTspice показывают, что по достигнутому уровню параметров предлагаемые схемотехнические решения могут быть рекомендованы для применения в устройствах обработки аналоговых сигналов датчиков.

Литература

1. Учет одновременного воздействия низких температур и проникающей радиации на характеристики биполярных и JFET транзисторов при схемотехническом моделировании / **О. В. Дворников, В. А. Чеховский, Н. Н. Прокопенко и др.** // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 1. С. 46–55. doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-46-55>
2. **Прокопенко Н. Н., Дворников О. В., Бузакова А. В.** Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков: монография. М.: Солон-Пресс, 2021. 200 с.
3. Проектирование компараторов напряжений на базе элементов радиационно-стойкого низкотемпературного BiJFET базового матричного кристалла МН2ХА030 / **О. В. Дворников, Н. Н. Прокопенко, В. А. Чеховский и др.** // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 4. С. 10–16. doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-4-10-16>
4. Проектирование аналоговых микросхем для экстремальных условий эксплуатации на основе базового матричного кристалла МН2ХА031 / **О. В. Дворников, В. А. Чеховский, Н. Н. Прокопенко и др.** // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 2. С. 37–46. doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-37-46>
5. **Дворников О. В., Дятлов В. Л., Прокопенко Н. Н., Чеховский В. А.** Базовый структурный кристалл для изготовления аналоговых интерфейсов малочувствительных к проникающим излучениям // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 10. С. 1031–1038. doi: <https://doi.org/10.7868/80033849417090078>
6. **Citterio M., Rescia S., Radeka V.** Radiation effects at cryogenic temperatures in Si-JFET, GaAs MESFET, and MOSFET devices // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1995. Vol. 42. Iss. 6. P. 2266–2270. doi: <https://doi.org/10.1109/23.489425>
7. High temperature MESFET based integrated circuits operating up to 300/spl deg/C / **J. Wurfl, B. Janke, E. Nebauer et al.** // International Electron Devices Meeting, Technical Digest. San Francisco, CA: IEEE, 1996. P. 219–222. doi: <https://doi.org/10.1109/IEDM.1996.553572>
8. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs / **Y. Hibi, H. Matsuo, H. Ikeda et al.** // Cryogenics. 2016. Vol. 73. P. 8–13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.006>
9. **Camín D. V., Fedyakin N., Pessina G., Previtali A. E.** Monolithic cryogenic preamplifiers based on large gate-area GaAs MESFETs // Proceedings of 1994 IEEE Nuclear Science Symposium – NSS'94. Norfolk, VA: IEEE, 1994. Vol. 1. P. 266–269. doi: <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1994.474414>
10. Monolithic GaAs current-sensitive cryogenic preamplifier for calorimetry applications / **G. Battistoni, D. V. Camín, N. Fedyakin et al.** // Nuclear Physics B – Proceedings Supplements. 1998. Vol. 61. Iss. 3. P. 511–519. doi: [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(97\)00611-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00611-7)
11. Cryogenic performance of monolithic MESFET preamplifiers for LAr calorimetry / **G. Battistoni, D. V. Camín, N. Fedyakin et al.** // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1997. Vol. 395. Iss. 1. P. 134–140. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00627-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00627-X)
12. **Camín D., Pessina G.** Cryogenic ASICs in GaAs for applications with particle detectors // J. Phys. IV France. 1996. Vol. 06. No. C3. P. C3-225–C3-230. doi: <https://doi.org/10.1051/jp4:1996334>
13. **Fresina M.** Trends in GaAs HBTs for wireless and RF // 2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Atlanta, GA: IEEE, 2011. P. 150–153. doi: <https://doi.org/10.1109/BCTM.2011.6082769>
14. **Zampardi P. J., Sun M., Cismaru C., Li J.** Prospects for a BiCFET III-V HBT Process // 2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). La Jolla, CA: IEEE, 2012. P. 1–3. doi: <https://doi.org/10.1109/CSICS.2012.6340116>
15. Electrical properties of the InP/InGaAs *pnp* heterostructure-emitter bipolar transistor / **J. H. Tsai, W. Ch. Liu, D. F. Guo et al.** // Semiconductors. 2008. Vol. 42. P. 346–349. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063782608030196>
16. **Liu W., Hill D., Costa D., Harris J. S.** High-performance microwave AlGaAs-InGaAs Pnp HBT with high-DC current gain // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 1992. Vol. 2. Iss. 8. P. 331–333. doi: <https://doi.org/10.1109/75.153604>
17. Integrated complementary HBT microwave push-pull and Darlington amplifiers with PNP active loads / **K. W. Kobayashi, D. K. Umemoto, J. R. Velebir et al.** // GaAs IC Symposium Technical Digest 1992. Miami Beach, FL: IEEE, 1992. P. 313–316. doi: <https://doi.org/10.1109/GAAS.1992.247281>

18. Арсенид-галлиевый аналоговый базовый кристалл / **О. В. Дворников, А. А. Павлючик, Н. Н. Прокопенко и др.** // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 2. С. 47–54. doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-47-54>
19. **Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N., Titov A. E.** Comparison of fast response and noise of charge-sensitive amplifiers with various types of input Fets // 2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL). Banja Luka: IEEE, 2020. P. 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/INDEL50386.2020.9266185>
20. **Lan D., Ning Y., Wang J., Jiang H.** High performance two-stage bootstrapped GaAs comparator with gain enhancement // 2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON). Cocoa Beach, FL: IEEE, 2015. P. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/WAMICON.2015.7120379>
21. **Chumakov V., Pakhomov I., Klejmenkin D. V., Kunts A.** Gallium arsenide buffer amplifier: preprint // TechRxiv [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.17194979.v1> (дата обращения: 17.05.2022).

Статья поступила в редакцию 28.12.2021 г.; одобрена после рецензирования 29.03.2022 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторах

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

Павлючик Алексей Арсеньевич – заместитель директора по научной работе и инновациям – начальник НПЦ «Технология» ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» (Беларусь, 220024, г. Минск, ул. Лейтенанта Кижеватова, 86, корп. 2), mniirm@mniirm.by

Прокопенко Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета (Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1); заведующий Научно-исследовательской лабораторией проблем проектирования в экстремальной микроэлектронике Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3) и Донского государственного технического университета (Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), prokopenko@sssu.ru

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

Кунц Алексей Вадимович – аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6), alexeykunts97@gmail.com

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

References

1. Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N., Galkin Ya. D., Kunts A. V. Taking into account the simultaneous effect of low temperatures and penetrating radiation on the characteristics of the bipolar and JFETs in circuit simulation. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MES)*, 2020, no. 1, pp. 46–55. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-46-55>

2. Prokopenko N. N., Dvornikov O. V., Bugakova A. V. *Design of low temperature and radiation-resistant analog ICs for sensor signal processing*. Moscow, Solon-Press Publ., 2021. 200 p. (In Russian).
3. Dvornikov O. V., Chekhovskiy V. A., Dzyatlov V. L., Prokopenko N. N., Budyakov P. S. Design of voltage comparators based on the elements of the radiation-hardened low-temperature BiJFET array chip MH2XA030. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MES)*, 2018, no. 4, pp. 10–16. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-4-10-16>
4. Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N., Galkin Y. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. Analog integrated circuits design for extreme environmental conditions on the base of master slice array MH2XA031. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MES)*, 2021, no. 2, pp. 37–46. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-37-46>
5. Dvornikov O. V., Dyatlov V. L., Prokopenko N. N., Chekhovskiy V. A. Configurable structured array for fabrication of radiation-hardened analog interfaces. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2017, vol. 62, iss. 10, pp. 1193–1199. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064226917090078>
6. Citterio M., Rescia S., Radeka V. Radiation effects at cryogenic temperatures in Si-JFET, GaAs MESFET, and MOSFET devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1995, vol. 42, iss. 6, pp. 2266–2270. doi: <https://doi.org/10.1109/23.489425>
7. Wurfl J., Janke B., Nebauer E., Thierbach S., Wolter P. High temperature MESFET based integrated circuits operating up to 300/spl deg/C. *International Electron Devices Meeting. Technical Digest*. San Francisco, CA, IEEE, 1996, pp. 219–222. doi: <https://doi.org/10.1109/IEDM.1996.553572>
8. Hibi Y., Matsuo H., Ikeda H., Fujiwara M., Kang L., Chen J., Wu P. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs. *Cryogenics*, 2016, vol. 73, pp. 8–13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.006>
9. Camin D. V., Fedyakin N., Pessina G., Previtali A. E. Monolithic cryogenic preamplifiers based on large gate-area GaAs MESFETs. *Proceedings of 1994 IEEE Nuclear Science Symposium – NSS'94*. Norfolk, VA, IEEE, 1994, vol. 1, pp. 266–269. doi: <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1994.474414>
10. Battistoni G., Camin D. V., Fedyakin N., Pessina G., Sala P. Monolithic GaAs current-sensitive cryogenic preamplifier for calorimetry applications. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 1998, vol. 61, iss. 3, pp. 511–519. doi: [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(97\)00611-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00611-7)
11. Battistoni G., Camin D. V., Fedyakin N., Pessina G., Sironi M. Cryogenic performance of monolithic MESFET preamplifiers for LAr calorimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1997, vol. 395, iss. 1, pp. 134–140. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00627-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00627-X)
12. Camin D., Pessina G. Cryogenic ASICs in GaAs for applications with particle detectors. *J. Phys. IV France*, 1996, vol. 06, no. C3, pp. C3-225–C3-230. doi: <https://doi.org/10.1051/jp4:1996334>
13. Fresina M. Trends in GaAs HBTs for wireless and RF. *2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*. Atlanta, GA, IEEE, 2011, pp. 150–153. doi: <https://doi.org/10.1109/BCTM.2011.6082769>
14. Zampardi P. J., Sun M., Cismaru C., Li J. Prospects for a BiCFET III-V HBT process. *2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*. La Jolla, CA, IEEE, 2012, pp. 1–3. doi: <https://doi.org/10.1109/CSICS.2012.6340116>
15. Tsai J. H., Liu W. Ch., Guo D. F., Kang Y. Ch., Chiu Sh. Y., Lour W. Sh. Electrical properties of the InP/InGaAs *pnp* heterostructure-emitter bipolar transistor. *Semiconductors*, 2008, vol. 42, pp. 346–349. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063782608030196>
16. Liu W., Hill D., Costa D., Harris J. S. High-performance microwave AlGaAs-InGaAs Pnp HBT with high-DC current gain. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1992, vol. 2, iss. 8, pp. 331–333. doi: <https://doi.org/10.1109/75.153604>
17. Kobayashi K. W., Umamoto D. K., Velebir J. R., Streit D. C., Oki A. K. Integrated complementary HBT microwave push-pull and Darlington amplifiers with PNP active loads. *GaAs IC Symposium Technical Digest 1992*. Miami Beach, FL, IEEE, 1992, pp. 313–316. doi: <https://doi.org/10.1109/GAAS.1992.247281>
18. Dvornikov O. V., Paulyuchyk A. A., Prokopenko N. N., Tchekhovskiy V. A., Kunts A. V., Chumakov V. E. GaAs analog master slice. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MES)*, 2021, no. 2, pp. 47–54. doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-47-54>
19. Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N., Titov A. E. Comparison of fast response and noise of charge-sensitive amplifiers with various types of input Fets. *2020 International Symposium on*

Industrial Electronics and Applications (INDEL). Banja Luka, IEEE, 2020, pp. 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/INDEL50386.2020.9266185>

20. Lan D., Ning Y., Wang J., Jiang H. High performance two-stage bootstrapped GaAs comparator with gain enhancement. *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*. Cocoa Beach, FL, IEEE, 2015, pp. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/WAMICON.2015.7120379>

21. Chumakov V., Pakhomov I., Klejmenkin D. V., Kunts A. Gallium arsenide buffer amplifier, preprint. *TechRxiv*. 2021. Available at: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.17194979.v1> (accessed: 17.05.2022).

The article was submitted 28.12.2021; approved after reviewing 29.03.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the authors

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

Alexey A. Pavlyuchik – Deputy Director for Research and Innovation – Head of the SPC “Technology”, “Minsk Research Institute of Radio Materials” JSC (Belarus, 220024, Minsk, Lieutenant Kizhevatov st., 86, bld. 2), mniirm@mniirm.by

Nikolay N. Prokopenko – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Information Systems and Radio Engineering Department, Don State Technical University (Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1); Head of the Research Laboratory of Design Problems in Extreme Microelectronics, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3) and Don State Technical University (Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), prokopenko@sssu.ru

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

Alexey V. Kunts – PhD student of the Micro and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, Petrus Brovka st., 6), alexeykunts97@gmail.com

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

Уважаемые авторы!

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

Схемная реализация модулярных сумматоров в заказных КМОП СБИС и FPGA

П. Н. Бибило, Н. А. Кириенко

*Объединенный институт проблем информатики Национальной
академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь*

bibilo@newman.bas-net.by

Аннотация. При создании быстродействующих вычислительных систем на основе заказных цифровых СБИС и FPGA (Field-Programmable Gate Array) часто используется модулярная арифметика. В настоящее время аппаратная реализация нейронных сетей на базе модулярных арифметических вычислений является актуальной задачей. В работе рассмотрена задача реализации модулярных сумматоров в библиотеке проектирования заказных КМОП СБИС и FPGA. В качестве исходных описаний модулярных сумматоров использованы системы как полностью, так и неполностью определенных (частичных) булевых функций, а также алгоритмические описания на языке VHDL. Логическая оптимизация, предвещающая логический синтез, проведена в классе дизъюнктивных нормальных форм, полиномиальных представлений Рида – Маллера и представлений систем булевых функций бинарными диаграммами решений. Проведено девять экспериментов по эффективности применения логической оптимизации при схемной реализации модулярных сумматоров в библиотеке проектирования заказных КМОП СБИС и FPGA. Полученные схемы модулярных сумматоров для КМОП СБИС оценены по площади (суммарному числу транзисторов), задержке и энергопотреблению, для FPGA – по числу программируемых логических элементов и энергопотреблению. Результаты экспериментов показывают, что использование моделей частичных функций и предварительной логической оптимизации на основе бинарных диаграмм решений позволяет получать модулярные сумматоры, характеризующиеся меньшими значениями задержки. Алгоритмические VHDL-модели позволяют получать КМОП-схемы модулярных сумматоров с меньшей площадью и меньшим энергопотреблением.

Ключевые слова: модулярные вычисления, модулярный сумматор, булева функция, дизъюнктивная нормальная форма, полином Рида – Маллера, бинарная диаграмма решений, синтез логической схемы, VHDL, FPGA

Для цитирования: Бибило П. Н., Кириенко Н. А. Схемная реализация модулярных сумматоров в заказных КМОП СБИС и FPGA // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 489–505. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-489-505>

Circuit implementation of modular adders in custom CMOS VLSI and FPGA

P. N. Bibilo, N. A. Kirienko

The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

bibilo@newman.bas-net.by

Abstract. Modular arithmetic is often used to create high-speed computing systems based on both custom digital VLSI and FPGA. The problems of hardware implementation of neural networks based on modular arithmetic calculations are relevant at the present time. In this work, the problem of implementing modular adders in the library for designing custom CMOS VLSI and FPGA is considered. Systems of both fully and incompletely defined (partial) Boolean functions, as well as algorithmic descriptions in the VHDL language, are used as initial descriptions of modular adders. Logical optimization preceding logical synthesis was carried out in the class of disjunctive normal forms, Reed – Muller polynomial representations, and representations of Boolean function systems by binary decision diagrams. Nine experiments have been carried out on the efficiency of applying logic optimization in the circuit implementation of modular adders in the library for designing custom CMOS VLSI and FPGA. The obtained circuits of modular adders for CMOS VLSI were estimated by area (total number of transistors), delay and power consumption, for FPGA by the number of programmable logic elements and power consumption. The experimental results show that the use of partial function models and preliminary logical optimization based on binary decision diagrams allows obtaining modular adders characterized by lower delay values. Algorithmic VHDL models make it possible to obtain CMOS circuits of modular adders with a smaller area and lower power consumption.

Keywords: modular computation, modular adder, Boolean function, disjunctive normal form, DNF, Reed-Muller polynomial, binary decision diagram, logic circuit synthesis, VHDL, FPGA

For citation: Bibilo P. N., Kirienko N. A. Circuit implementation of modular adders in custom CMOS VLSI and FPGA. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 489–505. doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-489-505

Введение. Создание эффективных параллельных вычислительных систем, как правило, опирается на модулярные вычисления [1, 2] и соответствующие им аппаратные реализации [3]. Проведены экспериментальные исследования схемных реализаций модулярных сумматоров для заказных СБИС. В работе [4] представлены различные способы алгоритмического описания сумматоров и приведены используемые приемы предварительной технологически независимой оптимизации реализуемых сумматорами систем булевых функций. Синтез схем не только модулярных сумматоров, но и различных функциональных комбинационных блоков заказных

цифровых СБИС в заданном базисе (библиотеке) логических элементов традиционно разбивается на два больших этапа: технологически независимая оптимизация реализуемых систем булевых функций и технологическое отображение – синтез. Под технологическим отображением понимается выделение в оптимизированных описаниях фрагментов, соответствующих функциям элементов технологической библиотеки (базиса синтеза), и покрытие описаний такими фрагментами. Решающее влияние на основные параметры (сложность, быстродействие, энергопотребление) логических схем оказывает первый этап.

В настоящей работе в отличие от работы [4] предлагается описывать функции модулярных сумматоров системами частичных (неполностью определенных) булевых функций и осуществлять логическую оптимизацию, выполняя совместную минимизацию в классах дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ) [5, 6], полиномиальных представлений Рида – Маллера [7] и BDD-представлений (Binary Decision Diagrams) [8]. Экспериментально установлено, что использование моделей частичных функций и предварительной логической оптимизации позволяет значительно улучшить параметры синтезируемых логических схем по сравнению с применением функциональных описаний сумматоров, соответствующих моделям полностью определенных булевых функций. Полученные решения для заказных КМОП СБИС сравнивали со схемными реализациями, получаемыми в синтезаторе LeonardoSpectrum [9], при задании входных данных в виде алгоритмических VHDL-описаний. Схемную реализацию VHDL-описаний модулярных сумматоров для FPGA (Field-Programmable Gate Array) семейства Kintex-7 [10] осуществляли в системе автоматизированного проектирования Vivado (компания Xilinx) [11].

Пример модулярного сумматора. Суммирование по модулю p_i (основание модулярной вычислительной системы) для двух чисел (операндов) a, b , находящихся в диапазоне $\{0, 1, \dots, p_i\}$, выполняется согласно формулам

$$|a+b|_{p_i} = (a+b-p_i), \text{ если } (a+b) \geq p_i,$$

$$|a+b|_{p_i} = (a+b), \text{ если } (a+b) < p_i.$$

Число N двоичных разрядов, представляющих числа a, b , определяется по формуле $N = \lceil \log_2 a \rceil$, где $\lceil A \rceil$ – ближайшее целое, большее либо равное A . Аналогично число M двоичных разрядов, представляющих числа $\{0, 1, \dots, p_i\}$, определяется по формуле $M = \lceil \log_2 p_i \rceil$. В табл. 1 приведена система частичных булевых функций $y_2(a_2, a_1, b_2, b_1)$, $y_1(a_2, a_1, b_2, b_1)$, задающая сумматор по модулю 3 ($p_i=3$), числа a, b принимают значения из диапазона $\{0, 1, 2\}$. Неопределенные значения булевых функций y_2, y_1 обозначены символом «-».

Таблица 1
Сумматор по модулю 3 – система
частичных булевых функций
Table 1
Modulo 3 adder – system of partial
Boolean functions

a		b	$ a+b _3$		
a_2	a_1	b_2	b_1	y_2	y_1
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	-	-
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0
0	1	1	1	-	-
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1
1	0	1	1	-	-
1	1	0	0	-	-
1	1	0	1	-	-
1	1	1	0	-	-
1	1	1	1	-	-

Алгоритмы и программы логической минимизации. Перед выполнением некоторых процедур технологически независимой логической оптимизации проводили доопределение (замену) неопределенных значений в таблицах истинности частичных булевых функций нулевыми значениями. Такое доопределение будем называть нулевым.

Минимизация в классе ДНФ. Совместная минимизация систем булевых функций, реализуемых модулярными сумматорами, выполнялась программой Espresso ПС [5] и программой Minim [6], входящей в систему логической оптимизации FLC-2 [12]. В

Таблица 2
Минимизированные ДНФ
сумматора по модулю 3

Table 2
Minimized DNF of adder modulo 3

Минимизация			
полностью определенных булевых функций (нулевое доопределение)		системы частичных функций (ненулевое доопределение)	
$a_2 a_1 b_2 b_1$	y_2, y_1	$a_2 a_1 b_2 b_1$	y_2, y_1
0 0 0 1	0 1	0 0 - 1	0 1
0 1 0 0	0 1	0 0 1 -	1 0
1 0 1 0	0 1	- 1 0 0	0 1
0 0 1 0	1 0	- 1 - 1	1 0
0 1 0 1	1 0	1 - 0 0	1 0
1 0 0 0	1 0	1 - 1 -	0 1

табл. 2 представлен результат минимизации программами Espresso ПС и Minim системы полностью определенных булевых функций сумматора по модулю 3 (см. табл. 1) при нулевом доопределении частичных функций и результат минимизации системы частичных функций.

Минимизированные ДНФ

$$y_2 = \bar{a}_2 \bar{a}_1 \bar{b}_2 \bar{b}_1 \vee a_1 b_1 \vee a_2 \bar{b}_2 \bar{b}_1,$$

$$y_1 = \bar{a}_2 \bar{a}_1 b_1 \vee a_1 \bar{b}_2 \bar{b}_1 \vee a_2 b_2$$

системы частичных функций содержат меньшее число литералов (отсутствующие литералы (см. табл. 2) обозначены символом «-»). Если перейти от минимизированных ДНФ к таблице истинности, то будет ясно, что при минимизации использовано ненулевое доопределение исходных частичных функций. В

примере сумматора по модулю 3 обе программы совместной минимизации выдали одинаковый результат – шесть ($k_{\min} = 6$) общих элементарных конъюнкций, входящих в совместно минимизированные ДНФ функций y_2, y_1 системы.

Минимизация в классе полиномов Рида – Маллера. Результат минимизации системы полностью определенных функций (см. табл. 1) при нулевом доопределении можно представить формулами

$$y_2 = \bar{a}_1 \bar{b}_2 \bar{b}_1 \oplus \bar{a}_2 \bar{b}_2 \oplus \bar{a}_2 \bar{b}_2 \bar{b}_1 \oplus \bar{a}_2 \bar{a}_1 \bar{b}_1 \oplus \bar{a}_2 \bar{a}_1 \bar{b}_2 \oplus \bar{a}_2 \bar{a}_1 \bar{b}_2 \bar{b}_1,$$

$$y_1 = \bar{a}_1 \bar{b}_1 \oplus \bar{a}_1 \bar{b}_2 \bar{b}_1 \oplus \bar{a}_2 \bar{b}_2 \bar{b}_1 \oplus \bar{a}_2 \bar{a}_1 \bar{b}_1 \oplus \bar{a}_2 \bar{a}_1 \bar{b}_2 \oplus \bar{a}_2 \bar{a}_1 \bar{b}_2 \bar{b}_1. \tag{1}$$

Соответствующая программа PoIRM построения полиномов Рида – Маллера также включена в систему FLC-2 и реализует алгоритм [7, с. 42], не требующий много памяти под промежуточные вычисления. Суммарное число элементарных конъюнкций в полиномах Рида – Маллера функций y_2, y_1 равно 12. Для этого примера результат совместной минимизации в классе ДНФ представляется более предпочтительным.

Минимизация в классе BDD-представлений частичных функций. Графовые BDD-представления систем функций строятся на основе разложения Шеннона. Разложением Шеннона полностью определенной либо частичной булевой функции $f = f(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, по переменной x_i называется представление

$$f = f(\mathbf{x}) = \bar{x}_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) \vee x_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n). \tag{2}$$

Функции $f_0 = f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$, $f_1 = f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ в правой части (2) называются кофакторами (cofactors) разложения по переменной x_i . Они получаются из функции f подстановкой вместо переменной x_i константы 0 и 1 соответственно. Каждая из подфункций f_0 и f_1 может быть разложена по одной из переменных из множества $\{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n\}$. Процесс разложения подфункций заканчивается, когда все n переменных будут использованы для разложения либо когда все подфункции выродятся до констант 0, 1, «-». Затем выполняется доопределение – замена неопределенных значений листовых переменных определенными 0, 1 с целью минимизации числа кофакторов, т. е. используется ненулевое доопределение. В результате оптимизации происходит доопределение системы частичных функций до полностью определенных.

Граф BDD (рис. 1) реализует многоуровневое представление системы полностью определенных функций (см. табл. 1) семью формулами разложения Шеннона:

$$\begin{aligned} y_2 &= \bar{a}_2 s_1 \vee a_2 s_2, & y_1 &= \bar{a}_2 s_3 \vee a_2 s_4, \\ s_1 &= \bar{a}_1 b_2 \vee a_1 s_6, & s_2 &= \bar{a}_1 s_7, \\ s_3 &= \bar{a}_1 s_6 \vee a_1 s_7, \\ s_6 &= \bar{b}_2 b_1, & s_7 &= \bar{b}_2 \bar{b}_1. \end{aligned} \tag{3}$$

Синтезированная по VHDL-описанию формул (3) логическая схема изображена на рис. 2, функции элементов схемы даны в табл. 3. Суммарное число транзисторов во всех элементах схемы равно 56, задержка схемы составляет 1,05 нс.

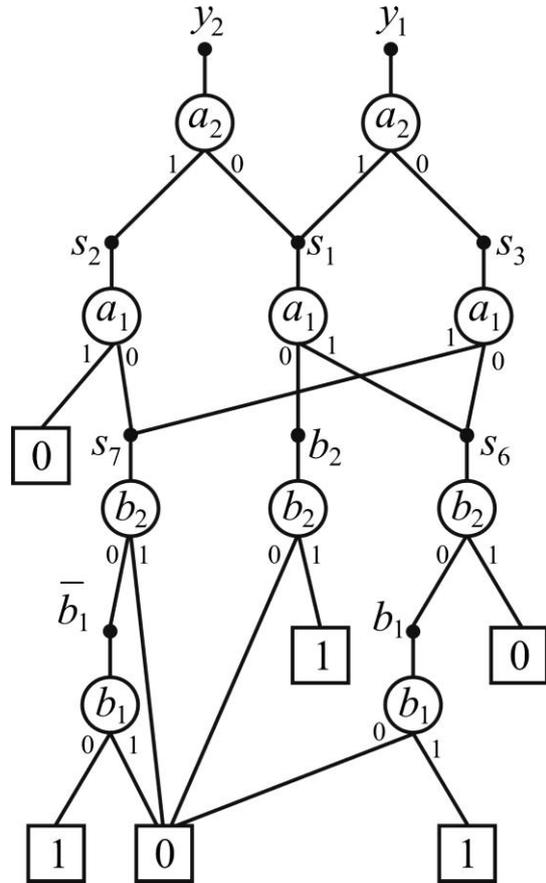


Рис. 1. Граф BDD, реализующий систему частичных функций (см. табл. 1)
Fig. 1. BDD graph implementing a system of partial functions (table 1)

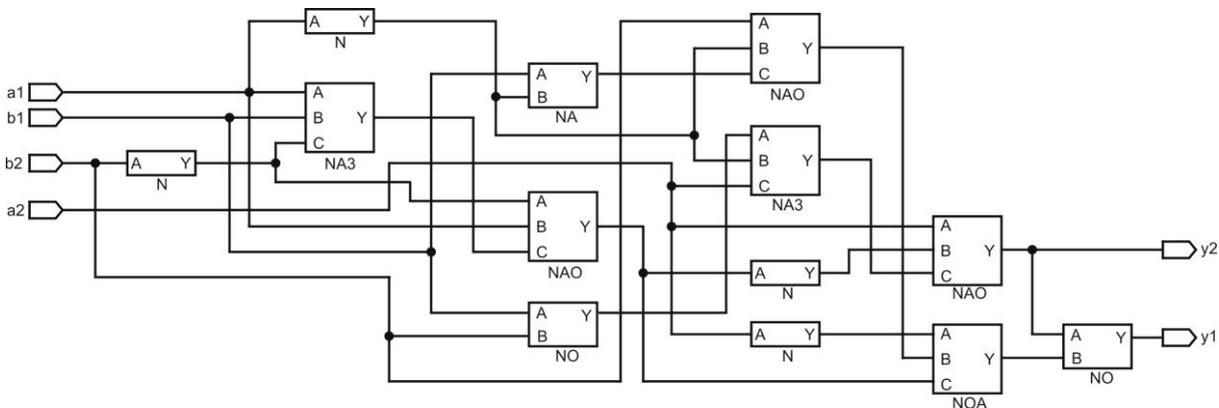


Рис. 2. Схема сумматора по модулю 3 в библиотечном базисе КМОП-элементов
Fig. 2. Scheme of the modulo 3 adder in the library basis of CMOS elements

Таблица 3
 Логические КМОП-элементы
 Table 3
 Logic CMOS elements

Элемент	Функция	Число транзисторов
N	$y = \bar{A}$, инвертор	2
NA	$y = \overline{AB}$	4
NO	$y = \overline{A \vee B}$	4
NAO	$y = \overline{(A \vee B)C}$	6
NOA	$y = \overline{(AB) \vee C}$	6
NA3	$y = \overline{ABC}$	6

Минимизация в классе BDDI-представлений полностью определенных функций. BDDI (Binary Decision Diagram with Inverse Cofactors) – ориентированный ациклический граф, задающий последовательные разложения Шеннона булевой функции $f(x_1, \dots, x_n)$ по всем ее переменным x_1, \dots, x_n при заданном порядке (перестановке) переменных, по которым проводятся разложения, при условии нахождения пар взаимно-инверсных кофакторов [13]. Отметим, что в BDD функциональная вершина реализует один кофактор, взаимно-инверсные кофакторы представляются парой вершин. Построение BDDI осуществлялось программой BDD_Builder [13] при нулевом доопределении исходной системы частичных функций. Программа BDD_Builder получила следующие девять взаимосвязанных формул разложения Шеннона:

$$\begin{aligned}
 y_2 &= \bar{a}_2 s_0 \vee a_2 s_1, & y_1 &= \bar{a}_2 s_2 \vee a_2 s_3, \\
 s_0 &= \bar{b}_2 s_5 \vee b_2 s_4, & s_1 &= \bar{b}_2 s_4, & s_2 &= \bar{b}_2 s_7, & s_3 &= b_2 s_4, \\
 s_4 &= \bar{a}_1 \bar{b}_1, & s_5 &= a_1 b_1, & s_7 &= \bar{a}_1 b_1 \vee a_1 \bar{b}_1.
 \end{aligned}$$

Таким образом, BDD-оптимизация частичных функций позволила получить лучший результат – шесть формул разложения Шеннона.

Описание экспериментов. Исходными описаниями логики являлись системы ДНФ булевых функций на языке SF в формате SDF (матричных описаний) [12]. В системе FLC-2 [12] выполнялась логическая оптимизация и осуществлялся перевод оптимизированных SF-описаний в описания на языке VHDL. В системе CMOSLD [14] выполнялась схемная реализация полученных VHDL-описаний в библиотеке проектирования отечественных КМОП СБИС с помощью синтезатора LeonardoSpectrum. Библиотека логических КМОП-элементов приведена в [14]. Для каждого описания схемы модулярного сумматора синтез осуществлялся с одними и теми же опциями управления синтезом. Для каждой полученной схемы подсчитывалась площадь схемы (суммарное число транзисторов во всех элементах схемы), временная задержка и энергопотребление (среднее значение потребляемого тока). Для оценки энергопотребления генерировались псевдослучайные тесты и проводилось схемотехническое моделирование SPICE-описаний схем. В экспериментах 1–7 синтезировались схемы 14 модулярных сумматоров, в экспериментах 8 и 9 синтезировались схемы 34 модулярных сумматоров.

Эксперимент 1 – схемная реализация исходных (неоптимизированных) VHDL-описаний систем совершенных ДНФ (СДНФ) полностью определенных функций. Использовалось нулевое доопределение в исходном задании. В рассматриваемом примере сумматора по модулю 3 получено следующее VHDL-описание.

Листинг 1. VHDL-описание сумматора по модулю 3 (см. табл. 1) при нулевом доопределении:

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
entity MOD_3 is
  port (
    a1, a2, b1, b2 : in std_logic;
    y1, y2 : out std_logic);
end entity MOD_3;
architecture sf of MOD_3 is
begin
y2<=((not a2 and not a1 and b2 and not b1) or
  (not a2 and a1 and not b2 and b1) or
  (a2 and not a1 and not b2 and not b1));
y1<=((not a2 and not a1 and not b2 and b1) or
  (not a2 and a1 and not b2 and not b1) or
  (a2 and not a1 and b2 and not b1));
end architecture sf;
```

Системы СДНФ

$$y_2 = \bar{a}_2\bar{a}_1b_2\bar{b}_1 \vee \bar{a}_2a_1\bar{b}_2b_1 \vee a_2\bar{a}_1\bar{b}_2\bar{b}_1,$$
$$y_1 = \bar{a}_2\bar{a}_1\bar{b}_2b_1 \vee \bar{a}_2a_1\bar{b}_2\bar{b}_1 \vee a_2\bar{a}_1b_2\bar{b}_1$$

булевых функций при нулевом доопределении системы частичных функций взяты из табл. 1. В эксперименте 1 подобные VHDL-описания модулярных сумматоров подавались на вход синтезатора LeonardoSpectrum.

Эксперимент 2 – предварительная логическая оптимизация в базисе полиномов Рида – Маллера и последующий синтез схемы. Использовалось нулевое доопределение на этапе исходного задания и логической оптимизации.

Эксперимент 3 – предварительная логическая оптимизация в базисе ДНФ программой Minim [6] и последующий синтез схемы. Использовалось ненулевое доопределение на этапе исходного задания и логической оптимизации.

Эксперимент 4 – предварительная логическая оптимизация в базисе ДНФ программой Espresso ПС [5] и последующий синтез схемы. Использовалось ненулевое доопределение на этапе исходного задания и логической оптимизации.

Эксперимент 5 – предварительная логическая оптимизация в классе BDD-представлений частичных функций [8, с. 201] и последующий синтез схемы. Использовалось ненулевое доопределение на этапе исходного задания и логической оптимизации.

Эксперимент 6 – предварительная логическая оптимизация в классе BDDI-представлений с помощью программы BDD-Builder [13] и последующий синтез схемы. Использовалось нулевое доопределение на этапе исходного задания и логической оптимизации.

Доопределения частичных функций сумматора по модулю 3, получаемые в экспериментах 1–6, показаны в табл. 4. Жирным шрифтом в табл. 4 выделены полностью определенные значения (0,1) функций, которые заменили неопределенные значения «-» исходных частичных функций.

Таблица 4

Доопределения исходных частичных булевых функций сумматора по модулю 3

Table 4

Extensions of the original partial Boolean functions of the modulo 3 adder

Исходное описание		Нулевое доопределение (эксперименты 1, 2, 6)		Ненулевое доопределение (эксперименты 3, 4)		Ненулевое доопределение (эксперимент 5)	
$a_2 a_1 b_2 b_1$	y_2, y_1	$a_2 a_1 b_2 b_1$	y_2, y_1	$a_2 a_1 b_2 b_1$	y_2, y_1	$a_2 a_1 b_2 b_1$	y_2, y_1
0000	00	0000	00	0000	00	0000	00
0001	01	0001	01	0001	01	0001	01
0010	10	0010	10	0010	10	0010	10
0011	--	0011	00	0011	11	0011	10
0100	01	0100	01	0100	01	0100	01
0101	10	0101	10	0101	10	0101	10
0110	00	0110	00	0110	00	0110	00
0111	--	0111	00	0111	10	0111	00
1000	10	1000	10	1000	10	1000	10
1001	00	1001	00	1001	00	1001	00
1010	01	1010	01	1010	01	1010	01
1011	--	1011	00	1011	01	1011	01
1100	--	1100	00	1100	11	1100	00
1101	--	1101	00	1101	10	1101	01
1110	--	1110	00	1110	01	1110	00
1111	--	1111	00	1111	11	1111	00

Эксперимент 7 – синтез схем модулярных сумматоров по алгоритмическим Verilog-моделям. В эксперименте использованы рассмотренные алгоритмические модели сумматоров [15]. Генератор Verilog для сумматора по произвольному модулю – реализация, предлагающая оптимальный вариант. Модели на языке Verilog конвертированы в функционально эквивалентные VHDL-описания, по которым в LeonardoSpectrum осуществлялся логический синтез с использованием той же библиотеки логических элементов.

Эксперимент 8 – синтез схем модулярных сумматоров по алгоритмическим VHDL-описаниям. В параметризованной алгоритмической VHDL-модели модулярных сумматоров число n задает число разрядов для представления чисел a, b , находящихся в диапазоне $\{0, 1, \dots, p_i\}$, параметр p равен p_i . Для сумматора по модулю 3 число $n = 2$ (число разрядов для представления чисел 0, 1, 2, 3 равно 2), число $p_i = 3$ (листинг 2). В листинге 2 параметры n, p выделены жирным шрифтом. Для сумматора по модулю 100 число $n = 7$ (нужно 7 разрядов для представления чисел из множества $\{0, 1, 2, \dots, 99, 100\}$, $p = 100$. VHDL-описание имеет следующий вид.

Листинг 2. Алгоритмическое VHDL-описание модулярного сумматора:

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.numeric_std.all;
```

```

entity MOD_3 is
generic( n : integer := 2;
        p : integer := 3);
port (
a, b : in std_logic_vector(1 to n);
y : out std_logic_vector (1 to n));
end mod_3;
architecture beh of MOD_3 is

signal e : integer range 0 to 2*p;
begin
p0: process (a, b)
variable a_int, b_int : integer range 0 to p;
variable r : integer range 0 to 2*p;
begin
a_int := to_integer(unsigned(a));
b_int := to_integer(unsigned(b));
r:= a_int + b_int;
if (r >= p) then e <= r - p;
elsif (r < p) then e <= r;
end if;
end process;
y <= std_logic_vector(to_unsigned(e, n));
end beh;

```

Эксперимент 9 – синтез FPGA-структур, реализующих схемы модулярных сумматоров по алгоритмическим VHDL-описаниям. Схемная реализация VHDL-описаний модулярных сумматоров для FPGA xc7k70tfbv676-1 семейства Kintex-7 осуществлялась в системе автоматизированного проектирования Vivado. Опции синтеза – Vivado Synthesis Default. Сложность схемы оценивалась в числе программируемых элементов LUT-6 (Look-Up Table) с 6 входными переменными. Значение потребляемой мощности (Total Power) кристалла FPGA выдавала система Vivado, так же как и число используемых LUT-6.

Результаты экспериментов. Результаты экспериментов 1–8 приведены в табл. 5–12, эксперимента 9 – в табл. 13. Имя примера Mod_p_i соответствует сумматору по модулю p_i . В табл. 5–12 используются следующие обозначения параметров систем функций: n – число переменных; m – число функций; k – число строк в таблице истинности, для которых функции сумматора определены (не являются строками, состоящими только из «-»); $\sum_{i=1}^m k_i$ – суммарное число элементарных конъюнкций в исходных (неминимизированных) СДНФ всех функций системы (суммарное число единичных элементов в правой части таблицы истинности); k_{\min} – число общих элементарных конъюнкций, входящих в совместно минимизированные ДНФ всех m функций системы; $\sum_{i=1}^m r_i$ – суммарное число элементарных конъюнкций в полиномах Рунда – Маллера всех m функций системы; $P, \vee, \&$ – параметры BDD-описаний; P – число литералов; \vee – число двухвходовых дизъюнкций; $\&$ – число двухвходовых конъюнкций.

Таблица 5

Результаты эксперимента 1

Table 5

The results of experiment 1

Схема	n, m, k	S	L	τ , нс	Z	I , мкА	t , с
mod_5	6, 3, 25	200	40	1,55	1000	14,13	24,89
mod_7	6, 3, 49	352	68	1,97	1000	26,97	112,47
mod_9	8, 4, 81	554	115	2,55	500	27,63	36,69
mod_15	8, 4, 225	1154	219	4,24	500	66,12	293,39
mod_17	10, 5, 289	1502	294	4,75	300	50,92	194,53
mod_19	10, 5, 361	1714	337	4,79	200	58,58	161,33
mod_23	10, 5, 529	3530	661	5,02	100	117,35	493,13
mod_25	10, 5, 625	4478	867	5,22	100	133,99	400,17
mod_27	10, 5, 729	6082	1143	5,40	70	167,24	619,00
mod_29	10, 5, 841	6190	1191	5,70	50	167,54	452,77
mod_31	10, 5, 961	8634	1594	6,63	50	225,13	1583,61
mod_37	12, 6, 1369	13356	2317	5,51	10	369,03	1621,46
mod_59	12, 6, 3481	36608	6151	6,76	10	817,35	10740,00
mod_61	12, 6, 3721	38560	6502	6,66	10	812,76	9420,00

Таблица 6

Результаты эксперимента 2

Table 6

The results of experiment 2

Схема	n, m, k	$\sum_{i=1}^m k_i$	$\sum_{i=1}^m r_i$	S	L	τ , нс	Z	I , мкА	t , с
mod_5	6, 3, 25	25	30	362	72	2,8	1000	23,58	99,67
mod_7	6, 3, 49	63	48	482	95	3,87	1000	43,27	86,23
mod_9	8, 4, 81	117	102	1084	205	6,03	500	54,60	91,50
mod_15	8, 4, 225	420	128	1392	271	5,07	500	95,93	355,91
mod_17	10, 5, 289	561	264	2660	502	7,71	300	111,28	502,82
mod_19	10, 5, 361	703	364	3742	715	7,44	200	140,56	583,89
mod_23	10, 5, 529	1104	509	5624	1044	7,48	100	294,66	721,77
mod_25	10, 5, 625	1350	760	7640	1407	8,13	100	344,77	742,34
mod_27	10, 5, 729	1620	696	6352	1182	8,33	70	358,51	382,22
mod_29	10, 5, 841	1943	650	6282	1147	8,8	50	332,09	262,51
mod_31	10, 5, 961	2325	320	3582	683	6,43	50	171,11	61,48
mod_37	12, 6, 1369	3330	1380	12354	2287	10,7	10	547,17	188,30
mod_59	12, 6, 3481	9853	1774	16012	2970	9,34	10	512,14	214,72
mod_61	12, 6, 3721	10736	1612	15144	2768	10,38	10	541,25	205,69

Таблица 7

Результаты эксперимента 3

Table 7

The results of experiment 3

Схема	n, m, k	k_{min}	S	L	τ , нс	Z	I , мкА	t , с
mod_5	6, 3, 25	18	164	33	*1,17	1000	16,76	22,26
mod_7	6, 3, 49	36	306	56	1,60	1000	31,30	45,21
mod_9	8, 4, 81	55	598	107	2,22	1000	51,41	99,14
mod_15	8, 4, 225	128	1136	192	2,50	1000	93,95	236,74
mod_17	10, 5, 289	166	1642	283	3,25	1000	124,52	392,84
mod_19	10, 5, 361	205	1800	306	3,30	500	136,90	231,60
mod_23	10, 5, 529	255	2354	399	2,94	1000	167,08	732,89
mod_25	10, 5, 625	327	3376	567	3,55	500	221,74	738,53
mod_27	10, 5, 729	372	3578	608	3,53	300	232,70	554,30
mod_29	10, 5, 841	403	3826	637	4,24	200	252,22	381,50
mod_31	10, 5, 961	358	3460	589	3,64	200	214,98	319,55
mod_37	12, 6, 1369	615	6444	1040	4,43	100	417,90	472,39
mod_59	12, 6, 3481	1154	13672	2227	5,20	50	733,10	2782,07
mod_61	12, 6, 3721	1162	13060	2141	5,45	50	704,90	1702,72

Таблица 8

Результаты эксперимента 4

Table 8

The results of experiment 4

Схема	n, m, k	k_{min}	S	L	τ , нс	Z	I , мкА	t , с
mod_5	6, 3, 25	18	202	40	1,47	1000	13,98	24,24
mod_7	6, 3, 49	36	228	48	*1,22	1000	22,59	34,50
mod_9	8, 4, 81	55	598	108	2,28	1000	39,01	84,90
mod_15	8, 4, 225	126	872	159	2,50	1000	67,83	161,00
mod_17	10, 5, 289	150	1802	319	3,03	1000	91,60	385,30
mod_19	10, 5, 361	198	2106	381	3,44	1000	103,22	542,50
mod_23	10, 5, 529	276	2368	415	3,34	500	138,04	355,80
mod_25	10, 5, 625	315	3430	596	3,90	500	195,50	777,60
mod_27	10, 5, 729	361	3656	629	4,32	300	217,45	503,00
mod_29	10, 5, 841	390	3448	589	3,65	200	204,51	311,50
mod_31	10, 5, 961	356	2820	488	3,58	200	189,34	210,20
mod_37	12, 6, 1369	563	6456	1070	4,69	100	320,78	492,50
mod_59	12, 6, 3481	1105	12040	1945	5,86	50	699,76	1191,00
mod_61	12, 6, 3721	1108	11654	1886	5,59	50	682,62	941,70

Таблица 9

Результаты эксперимента 5

Table 9

The results of experiment 5

Схема	n, m, k	$P, \nu, \&$	S	L	$\tau, \text{нс}$	Z	$I, \text{мкА}$	$t, \text{с}$
mod_5	6, 3, 25	87, 18, 42	*128	25	1,81	1000	*12,30	20,0
mod_7	6, 3, 49	117, 29, 57	246	47	1,67	1000	24,03	38,2
mod_9	8, 4, 81	216, 46, 105	390	76	*2,10	1000	34,42	64,4
mod_15	8, 4, 225	229, 55, 110	310	60	*2,04	1000	36,57	59,8
mod_17	10, 5, 289	440, 99, 213	768	139	2,95	1000	73,69	168,4
mod_19	10, 5, 361	376, 83, 183	458	89	*2,66	1000	42,31	84,1
mod_23	10, 5, 529	340, 76, 165	480	95	*2,82	1000	50,88	100,4
mod_25	10, 5, 625	458, 110, 222	722	144	*3,35	1000	70,77	158,7
mod_27	10, 5, 729	399, 96, 193	642	124	*2,92	1000	66,98	137,3
mod_29	10, 5, 841	456, 110, 221	702	134	*3,01	1000	74,10	165,7
mod_31	10, 5, 961	362, 88, 176	500	96	*2,36	1000	56,02	102,9
mod_37	12, 6, 1369	625, 142, 305	882	167	*3,70	1000	78,97	207,1
mod_59	12, 6, 3481	604, 146, 293	892	165	*3,82	1000	99,67	219,7
mod_61	12, 6, 3721	661, 160, 321	996	189	*4,36	1000	107,22	257,1

Таблица 10

Результаты эксперимента 6

Table 10

The results of experiment 6

Схема	n, m, k	$P, \nu, \&$	S	L	$\tau, \text{нс}$	Z	$I, \text{мкА}$	$t, \text{с}$
mod_5	6, 3, 25	93, 15, 46	218	40	1,54	5000	19,156	160,20
mod_7	6, 3, 49	131, 30, 65	260	53	2,23	1000	26,753	43,01
mod_9	8, 4, 81	273, 48, 136	524	101	2,63	1000	33,316	77,59
mod_15	8, 4, 225	354, 83, 176	712	133	2,70	1000	70,723	142,14
mod_17	10, 5, 289	507, 96, 252	938	178	*2,84	1000	64,631	169,79
mod_19	10, 5, 361	531, 100, 264	830	161	3,61	1000	58,113	152,56
mod_23	10, 5, 529	565, 123, 281	980	192	3,70	1000	79,363	214,22
mod_25	10, 5, 625	609, 143, 303	1134	214	4,30	1000	105,319	278,71
mod_27	10, 5, 729	788, 174, 392	1342	255	3,67	1000	113,217	329,60
mod_29	10, 5, 841	675, 161, 335	1328	255	4,14	1000	126,216	382,63
mod_31	10, 5, 961	646, 155, 321	1234	237	3,71	1000	117,837	329,32
mod_37	12, 6, 1369	1110, 226, 553	1948	363	3,52	1000	137,664	579,68
mod_59	12, 6, 3481	1564, 365, 779	2652	487	5,02	1000	220,931	2386,54
mod_61	12, 6, 3721	1067, 258, 530	2246	438	4,41	1000	217,834	954,05

Таблица 11

Результаты эксперимента 7

Table 11

The results of experiment 7

Схема	S	L	τ , нс	Z	I , мкА	t , с
mod_7	158	35	2,80	1000	22,50	30,00
mod_15	212	47	3,32	1000	31,24	43,73
mod_19	264	60	3,74	1000	38,07	56,47
mod_23	268	61	3,74	1000	40,02	59,40
mod_29	264	60	3,98	1000	41,06	59,14
mod_31	274	62	3,89	1000	38,86	58,45
mod_37	314	71	4,61	1000	47,51	73,72
mod_59	326	73	4,29	1000	51,23	77,65
mod_61	320	71	4,37	1000	49,52	75,98

Таблица 12

Результаты эксперимента 8

Table 12

The results of experiment 8

Схема	n, m	S	L	τ , нс	Z	I , мкА	t , с
mod_5	6, 3	144	33	3,22	1000	21,73	29,10
mod_7	6, 3	*132	29	3,19	1000	*18,37	24,08
mod_9	8, 4	*198	46	3,34	1000	*30,30	42,15
mod_15	8, 4	*184	42	3,47	1000	*25,70	36,83
mod_17	10, 5	*256	58	4,37	1000	*36,52	58,29
mod_19	10, 5	*266	60	3,67	1000	*39,91	61,65
mod_23	10, 5	*270	61	3,65	1000	*41,81	63,16
mod_25	10, 5	*260	59	4,38	1000	*40,34	59,92
mod_27	10, 5	*266	59	3,65	1000	*40,95	59,42
mod_29	10, 5	*262	59	4,40	1000	*40,74	59,75
mod_31	10, 5	*240	54	4,89	1000	*31,79	48,28
mod_37	12, 6	*312	71	4,41	1000	*49,02	75,72
mod_59	12, 6	*324	73	4,58	1000	*51,69	77,19
mod_61	12, 6	*316	71	4,45	1000	*49,18	74,37
mod_73	14, 7	372	85	5,03	1000	59,41	96,79
mod_82	14, 7	360	83	5,22	1000	58,58	92,46
mod_91	14, 7	382	86	4,78	1000	62,70	97,42
mod_100	14, 7	328	78	5,09	1000	52,62	82,79
mod_109	14, 7	376	85	5,06	1000	62,94	99,35
mod_118	14, 7	362	82	4,68	1000	57,65	100,22
mod_127	14, 7	334	80	5,99	1000	46,75	75,38
mod_136	16, 8	364	86	5,55	1000	55,19	90,37
mod_145	16, 8	424	97	5,51	1000	65,73	107,58
mod_154	16, 8	416	96	5,72	1000	66,63	109,48
mod_163	16, 8	432	98	5,43	1000	68,52	110,93
mod_172	16, 8	392	90	5,28	1000	63,57	101,03
mod_181	16, 8	428	97	5,55	1000	70,64	114,44

Окончание

Схема	n, m	S	L	τ , нс	Z	I , мкА	t , с
mod_190	16, 8	418	95	5,22	1000	65,04	105,99
mod_199	16, 8	436	99	5,43	1000	69,49	112,90
mod_208	16, 8	342	81	5,55	1000	54,73	86,98
mod_217	16, 8	430	98	5,55	1000	69,52	114,01
mod_226	16, 8	416	96	5,72	1000	64,64	107,37
mod_235	16, 8	436	98	5,43	1000	69,64	111,96
mod_244	16, 8	396	91	5,65	1000	61,74	100,84

Таблица 13

Результаты эксперимента 9

Table 13

The results of experiment 9

Схема	n, m	LUT-6	Total Power
mod_5	6, 3	3	1,728
mod_7	6, 3	3	1,852
mod_9	8, 4	11	2,804
mod_15	8, 4	10	2,776
mod_17	10, 5	10	3,541
mod_19	10, 5	11	3,631
mod_23	10, 5	9	3,442
mod_25	10, 5	10	3,652
mod_27	10, 5	11	3,708
mod_29	10, 5	10	3,782
mod_31	10, 5	10	3,551
mod_37	12, 6	12	5,052
mod_59	12, 6	10	5,085
mod_61	12, 6	13	4,973
mod_73	14, 7	14	5,883
mod_82	14, 7	14	6,264
mod_91	14, 7	15	6,121
mod_100	14, 7	12	5,436
mod_109	14, 7	15	6,652
mod_118	14, 7	11	5,716
mod_127	14, 7	15	5,364
mod_136	16, 8	14	6,611
mod_145	16, 8	14	6,676
mod_154	16, 8	16	7,264
mod_163	16, 8	16	7,588
mod_172	16, 8	13	6,498
mod_181	16, 8	17	7,618
mod_190	16, 8	18	6,269
mod_199	16, 8	15	7,366
mod_208	16, 8	10	6,016
mod_217	16, 8	17	7,586
mod_226	16, 8	18	7,245
mod_235	16, 8	17	7,039
mod_244	16, 8	15	6,863

Для рассмотренного примера модулярного сумматора (см. табл. 1) $n = 4$, $m = 2$, $k = 9$, $k_1 = 3$, $k_2 = 3$, $\sum_{i=1}^2 k_i = 6$. Результаты совместной минимизации в классе ДНФ систем функций даны в табл. 2, в правой части которой система ДНФ характеризуется следующими параметрами: $n = 4$, $m = 2$, $k_{\min} = 6$. Для полиномов Рида – Маллера, представленных формулами (1), $r_1 = 6$, $r_2 = 6$, $\sum_{i=1}^2 r_i = 12$. Для BDD-представлений (2) число литералов булевых переменных $P = 22$, число операторов двухвыходовых дизъюнкций $\vee = 4$, число операторов двухвыходовых конъюнкций $\& = 11$. В формулах (2) не показаны в явном виде 11 операторов логического умножения, например формула $y_2 = \bar{a}_2 s_0 \vee a_2 s_1 = \bar{a}_2 \& s_0 \vee a_2 \& s_1$ содержит два оператора $\&$ логического умножения.

Логические схемы из библиотечных КМОП-элементов оценивали согласно следующим параметрам: S – площадь (суммарное число транзисторов во всех элементах схемы); L – число логических элементов; τ – задержка, нс; I – потребляемый ток, мкА. Параметры, характеризующие моделирование: t – время моделирования Spice-описания схемы, с; Z – число тестовых наборов (длина теста) для моделирования Spice-описания схемы. Для экспериментов 1–6, 8 символом * отмечены лучшие решения по площади, задержке и энергопотреблению.

Заключение. Результаты экспериментов 1–8 показывают, что описания модулярных сумматоров системами полностью определенных функций являются неконкурентоспособными для получения логических схем из библиотечных КМОП-элементов, даже если для предварительной оптимизации используются эффективные программы глобальной логической минимизации систем функций в различных классах их представлений. В качестве таких программ применены программы совместной минимизации систем функций в классе дизъюнктивных нормальных форм, полиномов Рида – Маллера, бинарных диаграмм решений.

Использование моделей частичных функций и предварительной логической оптимизации на основе BDD-представлений (эксперимент 5) позволяет получить по таблицам истинности модулярные сумматоры, характеризующиеся меньшими значениями задержки. Дополнительная минимизация полученных многоуровневых BDD-представлений, выполненная с помощью алгоритмов алгебраического разложения кофакторов [16], не позволяет улучшить временные задержки схем, полученных в эксперименте 5.

Алгоритмические VHDL-модели (эксперименты 7, 8) позволяют получить схемы модулярных сумматоров с меньшей площадью (меньшим числом транзисторов) и меньшим энергопотреблением.

Результаты эксперимента 9 показывают, что аппаратная сложность функциональных блоков FPGA, реализующих схемы модулярных сумматоров, незначительно возрастает при увеличении модуля p .

Литература

1. Акушский И. Я., Юдицкий Д. И. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Советское радио, 1968. 440 с.
2. Червяков Н. И., Сахнюк П. А., Шапошников А. В., Ряднов С. А. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / под ред. Н. И. Червякова. М.: Физматлит, 2003. 288 с.

3. **Стемпковский А. Л., Корнилов А. И., Семенов М. Ю.** Особенности реализации устройств цифровой обработки сигналов в интегральном исполнении с применением модулярной арифметики // Информационные технологии. 2004. № 2. С. 2–9.
4. **Балака Е. С., Тельпухов Д. В., Осинин И. П., Городецкий Д. А.** Сравнительное исследование и анализ методов аппаратной реализации сумматоров по модулю // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2016. № 1 (23). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/2887> (дата обращения: 18.05.2022).
5. **Brayton K. R., Hachtel G. D., McMullen C. T., Sangiovanni-Vincentelli A. L.** Logic minimization algorithms for VLSI synthesis. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1984. 193 p.
6. **Торопов Н. Р.** Минимизация систем булевых функций в классе ДНФ // Логическое проектирование: сб. науч. тр. Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. Вып. 4. С. 4–19.
7. **Закревский А. Д., Торопов Н. Р.** Полиномиальная реализация частичных булевых функций и систем. 2-е изд., стер. М.: Едиториал УРСС, 2003. 200 с.
8. **Бибилко П. Н.** Применение диаграмм двоичного выбора при синтезе логических схем. Минск: Белорусская наука, 2014. 231 с.
9. **Бибилко П. Н.** Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. М.: Солон-пресс, 2005. 384 с.
10. **Соловьев В. В.** Архитектуры ПЛИС фирмы Xilinx: CPLD и FPGA 7-й серии. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 392 с.
11. **Тарасов И. Е.** ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 538 с.
12. **Бибилко П. Н., Романов В. И.** Система логической оптимизации функционально-структурных описаний цифровых устройств на основе продукционно-фреймовой модели представления знаний // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. № 4. С. 9–16. doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-4-9-16>
13. **Бибилко П. Н., Ланкевич Ю. Ю.** Использование полиномов Жегалкина при минимизации многоуровневых представлений систем булевых функций на основе разложения Шеннона // Программная инженерия. 2017. Т. 8. № 8. С. 369–384. doi: <https://doi.org/10.17587/prin.8.369-384>
14. Система логического проектирования функциональных блоков заказных КМОП СБИС с пониженным энергопотреблением / **П. Н. Бибилко, Н. А. Авдеев, С. Н. Кардаш и др.** // Микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 1. С. 72–88. doi: <https://doi.org/10.7868/S0544126918010076>
15. Генераторы Verilog (базовые операции). Модулярные сумматоры // Vscripts.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://vscripts.ru/w/Main> (дата обращения: 07.12.2021).
16. **Бибилко П. Н., Романов В. И.** Минимизация BDD-представлений систем полностью определенных булевых функций с использованием алгебраических разложений кофакторов // Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 8. С. 395–408. doi: <https://doi.org/10.17587/it.27.395-408>

Статья поступила в редакцию 01.02.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.03.2022 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторах

Бибилко Петр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6), bibilo@newman.bas-net.by, petr.olibib@yandex.ru

Кириенко Наталья Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6), natalia.kirienko@tut.by

References

1. Akushskiy I. Ya., Yuditskiy D. I. *Machine arithmetic in residual classes*. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1968. 440 p. (In Russian).
2. Chervyakov N. I. (auth., ed.), Sakhnuyk P. A., Shaposhnikov A. V., Ryadnov S. A. *Modular parallel computing structures of neuroprocessor systems*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 288 p. (In Russian).

3. Stempkovsky A. L., Kornilov A. I., Semenov M. Yu. The integrated implementation features of digital signal processing systems with the use of modular arithmetic. *Informatsionnyye tekhnologii = Information Technologies*, 2004, no. 2, pp. 2–9. (In Russian).
4. Balaka E., Telpukhov D., Osinin I., Gorodecky D. Comparative study and analysis methods hardware implementation RNS-based adders. *Universum: Technical Sciences*, electronic scientific journal, 2016, no. 1 (23). (In Russian). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/2887> (accessed: 18.05.2022).
5. Brayton K. R., Hachtel G. D., McMullen C. T., Sangiovanni-Vincentelli A. L. *Logic minimization algorithms for VLSI synthesis*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 1984. 193 p.
6. Toropov N. R. Minimization of Boolean functions systems in the DNF class. *Logicheskoye proyektirovaniye = Logic Design*, proceedings. Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the Academy of Sciences of Belarus, 1999, iss. 4, pp. 4–19. (In Russian).
7. Zakrevskiy A. D., Toropov N. R. *Polynomial implementation of incompletely specified Boolean functions and systems*. 2nd ed., ster. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 200 p. (In Russian).
8. Bibilo P. N. *Binary decision diagrams application in the synthesis of logic circuits*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 231 p. (In Russian).
9. Bibilo P. N. *VHDL based integrated circuit design systems. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum*. Moscow, Solon-press Publ., 2005. 384 p. (In Russian).
10. Solov'yev V. V. *Xilinx FPGA architectures: CPLD and FPGA series 7*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2016. 392 p. (In Russian).
11. Tarasov I. E. *FPGA Xilinx. Hardware description languages VHDL and Verilog, CAD, design techniques*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2020. 538 p. (In Russian).
12. Bibilo P. N., Romanov V. I. The system of logical optimization of digital circuits functional structural descriptions on production-frame knowledge representation model. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2020, no. 4, pp. 9–16. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-4-9-16>
13. Bibilo P. N., Lankevich Yu. Yu. The use of Zhegalkin polynomials for minimization of multilevel representations of Boolean functions based on Shannon expansion. *Programmnyaya ingeneria*, 2017, vol. 8, no. 8, pp. 369–384. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.17587/prin.8.369-384>
14. Bibilo P. N., Avdeev N. A., Kardash S. N., Kirienko N. A., Lankevich Yu. Yu., Loginova I. P., Romanov V. I., Cheremisinov D. I., Cheremisinova L. D. A system of logical design of custom CMOS VLSI functional blocks with reduced power consumption. *Russian Microelectronics*, 2018, vol. 47, iss. 1, pp. 65–81. doi: <https://doi.org/10.1134/S106373971801002X>
15. Verilog generators (basic operations). Modular adders. *Vscripts.ru*. Available at: <http://vscripts.ru/w/Main> (accessed: 07.12.2021).
16. Bibilo P. N., Romanov V. I. Minimization of binary decision diagrams for systems of completely defined Boolean functions using algebraic representations of cofactors. *Informatsionnyye tekhnologii = Information Technologies*, 2021, vol. 27, no. 8, pp. 395–408. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.17587/it.27.395-408>

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 05.03.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the authors

Petr N. Bibilo – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Laboratory, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (Belarus, 220012, Minsk, Surganov st., 6), bibilo@newman.bas-net.by

Natalia A. Kirienko – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (Belarus, 220012, Minsk, Surganov st., 6), kir@newman.bas-net.by

Научная статья
УДК 621.372.21:53.043
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-506-516

**Влияние квантово-размерных эффектов
на волновые характеристики
наномасштабных линий передачи и резонаторов**

Р. А. Браже

*Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия*

brazhe@ulstu.ru

Аннотация. Переход к более высоким (терагерцовым) частотам используемых электромагнитных волн позволяет повысить плотность передаваемой информации и скорость ее обработки, миниатюризировать соответствующие элементы и устройства и снизить их энергопотребление. Вместе с тем переход к наномасштабным размерам соответствующих линий передачи приводит к появлению квантово-размерных эффектов, обусловленных близостью их размеров к длине волны де Бройля в данных условиях. В работе проведена теоретическая оценка степени влияния квантовых эффектов на волновые характеристики различных наномасштабных линий передачи, выполненных на графене и углеродных нанотрубках: щелевой линии, несимметричной полосковой и двухпроводной линии. Получены рабочие формулы, позволяющие рассчитать результирующие значения волнового сопротивления, погонной индуктивности и погонной емкости таких линий передачи, а также добротности резонаторов, выполненных на их основе. Показано, что подобные наномасштабные линии передачи и резонаторы могут быть использованы на частотах, достигающих десятков терагерц.

Ключевые слова: наномасштабные линии передачи, резонаторы, терагерцовый диапазон, графен, углеродные нанотрубки, квантово-размерные эффекты, кванты погонных значений сопротивления, индуктивности и емкости, добротность резонатора

Для цитирования: Браже Р. А. Влияние квантово-размерных эффектов на волновые характеристики наномасштабных линий передачи и резонаторов // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 506–516. doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-506-516

Original article

The influence of quantum-dimensional effects on the wave characteristics of nanoscale transmission lines and resonators

R. A. Brazhe

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

brazhe@ulstu.ru

Abstract. The transition to higher (terahertz) frequencies of the electromagnetic waves used makes it possible to increase the density of transmitted information and the speed of its processing, to miniaturize the corresponding elements and devices and reduce their energy consumption. At the same time, the transition to nanoscale sizes of the corresponding transmission lines leads to the appearance of a number of quantum-dimensional effects due to the proximity of their sizes to the de Broglie wavelength under these conditions. In this work, a theoretical assessment is made of the degree of influence of quantum effects on the wave characteristics of various nanoscale transmission lines made on graphene and carbon nanotubes: a slot line, an asymmetric strip line, a two-wire line. Working formulas have been obtained that allow calculating the resulting values of wave resistance, inductance per unit length and capacitance per unit length of such transmission lines, as well as the Q-factor of resonators made on their basis. It was demonstrated that such nanoscale transmission lines and resonators can be used at frequencies reaching tens of terahertz.

Keywords: nanoscale transmission lines, resonators, terahertz range, graphene, carbon nanotubes, quantum-dimensional effects, quanta of resistance, inductance and capacitance per unit length, Q-factor of the resonator

For citation: Brazhe R. A. The influence of quantum-dimensional effects on the wave characteristics of nanoscale transmission lines and resonators. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 506–516. doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-506-516

Введение. Повышение плотности передаваемой информации и увеличение скорости ее обработки вызывают необходимость перехода к высоким частотам используемых электромагнитных волн в инфокоммуникационных и электронных устройствах, а также в системах беспроводной связи для наносетевых комплексов, включающих в себя наномеханизмы и нанороботы. Освоение терагерцового диапазона частот идет быстрыми темпами [1–4], и отмечается тенденция все большего приближения к оптическому диапазону.

На частотах порядка 100 ТГц длина электромагнитных волн в воздухе равна 3 мкм. Поэтому на таких частотах в качестве материала для линий передачи предлагается использовать графеновые наноленты и углеродные нанотрубки соответствующей хиральности, имеющие отличные электропроводящие свойства. Отметим, что в данных нанопроводниках одноатомной толщины невозможно ввести понятие скин-слоя и электроны в них под действием электрического поля электромагнитной волны участвуют только в одномерном движении. Фактически в такой линии передачи имеет место рас-

пространение связанных электромагнитных колебаний и одномерных колебаний плотности свободного электронного газа – плазмон-поляритонной волны. Ее длина примерно на два порядка меньше, чем длина электромагнитной волны такой же частоты [5]. Это означает, что ожидаемая длина плазмон-поляритонной волны в рассматриваемой линии передачи на частоте 100 ГГц будет порядка нескольких десятков нанометров. Такого же порядка должны быть и поперечные размеры линии.

Поскольку электроны в нанопроводнике находятся в потенциальной яме, ширина которой равна ширине наноленты или длине окружности поперечного сечения нанотрубки, то их энергия может принимать лишь дискретный набор значений. Наименьшее значение этой энергии отвечает ситуации, когда на ширине наноленты укладывается одна полуволна де Бройля для электрона, а на длине окружности нанотрубки одна его дебройлевская длина волны. Чтобы электрон оказался в таком состоянии, над ним нужно совершить некоторую работу, осуществляемую за счет энергии флуктуаций плотности электронного газа. Это эквивалентно наличию некоторого сопротивления потоку электронов (кванта сопротивления), которое имеет место даже в отсутствие их столкновений с кристаллической решеткой.

Электроны в металле находятся в зоне проводимости, состоящей из множества подуровней энергии, количество которых определяется скоростью Ферми электрона и размерами проводника. При протекании через линию передачи электрического тока электроны должны увеличивать свою энергию, переходя с одного подуровня на другой. Эти переходы происходят с задержкой по времени, что эквивалентно наличию некоторой индуктивности немагнитной природы, которая обуславливает инерционные свойства электронов. Такая индуктивность называется кинетической, и она также имеет квантовую природу.

Для перехода электрона с одного энергетического подуровня на другой ему необходимо сообщить энергию, не меньшую, чем энергия Ферми (средняя энергия, приходящаяся на один носитель заряда). При этом подуровни энергии играют роль пластин некоторого квантового конденсатора, в результате появляется еще и квантовая емкость линии передачи.

Цель настоящей работы – исследование влияния квантово-размерных эффектов на волновые характеристики наномасштабных линий передачи, выполненных из графеновых нанолент и углеродных нанотрубок, на частотах, приближающихся к оптическому диапазону.

Кванты погонных волновых характеристик наномасштабных линий передачи. Основы квантового транспорта электронов в наноструктурах изложены в работах [6, 7], согласно которым удельная проводимость σ_{20} каждого канала транспортирования электронов в двумерном электронном газе равна:

$$\sigma_{20} = \frac{e^2}{h}, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд; h – постоянная Планка.

Определяемая формулой (1) удельная проводимость σ_{20} обратна по смыслу сопротивлению фон Клитцинга $R_K = h/e^2 \approx 25812,8 \text{ Ом}$, известному из работ по квантовому эффекту Холла [8]. Из квантовых представлений следует, что на ширине наноленты должно укладываться целое число электронных полуволен де Бройля:

$$W = M(E_F)\lambda_B / 2 = M(E_F)\pi / k_F,$$

где $M(E_F) = Wk_F / \pi$ – число каналов электропроводности, обусловленное электронами, находящимися в различных стационарных состояниях; E_F и k_F – соответственно энергия и волновое число Ферми. Это число нужно умножить на спиновое g_s и долиное g_v вырождения энергетических состояний (для графена и углеродной нанотрубки $g_s = g_v = 2$). Тогда удельная 2D-электропроводность наноленты будет $\sigma_2 = M(E_F)g_s g_v e^2 / h$, а ее удельное 2D-сопротивление равно:

$$\rho_2 = h / (M(E_F)g_s g_v e^2). \quad (2)$$

Так как $k_F = \sqrt{2m_e E_F} / \hbar$ (m_e – масса электрона, $\hbar = h / (2\pi)$ – приведенная постоянная Планка), то, используя (2), погонное сопротивление наноленты можно найти в виде

$$R_{20} = \frac{\rho_2}{W} = \frac{h}{g_s g_v \sqrt{2m_e E_F}} \frac{R_K}{2W^2}. \quad (3)$$

В случае нанотрубки $W = \pi d$ (d – диаметр нанотрубки) на длине окружности ее поперечного сечения должно укладываться целое число электронных волн де Бройля. Поэтому для углеродной нанотрубки

$$R_{20} = \frac{\rho_2}{W} = \frac{h}{g_s g_v \sqrt{2m_e E_F}} \frac{R_K}{2(\pi d)^2}. \quad (4)$$

Представление о квантовой погонной индуктивности, не связанной с магнитным полем, а обусловленной пространственным квантованием энергии носителей заряда в разрешенной зоне проводника, введено в работе [5]. Квант погонной кинетической индуктивности линии передачи находится по формуле

$$L_0 = \frac{h}{2e^2 v_F}. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что скорость Ферми электрона в графене $v_F \approx 8 \cdot 10^5$ м/с, получаем для графена значение $L_0 = 16$ нГн/мкм.

На существование квантов погонной емкости в передающих линиях впервые указано в [9], в [5] это понятие конкретизировано и получено следующее выражение для такого кванта:

$$C_0 = \frac{2e^2}{h v_F}. \quad (6)$$

Соответственно для графена получаем $C_0 = 100$ аФ/мкм.

Анализируемые линии передачи и расчет их параметров. На рис. 1 представлены основные типы наномасштабных линий передачи: щелевая нанополосковая линия на графене, несимметричная нанополосковая линия на графене и двухпроводная линия на углеродных нанотрубках.

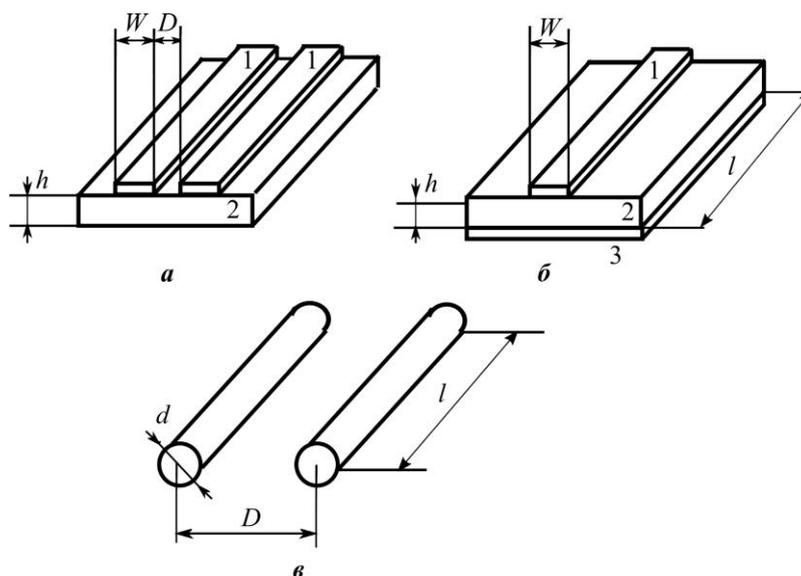


Рис. 1. Наномасштабные линии передачи: а – щелевая нанополосковая линия на графене; б – несимметричная нанополосковая линия на графене; в – двухпроводная линия на углеродных нанотрубках (W – нанополоски 1; D – расстояние между ними в случае (а) или между центрами нанотрубок в случае (в); h – толщина диэлектрической подложки 2 (карбид кремния с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,66$); d – диаметр нанотрубки; l – длина линии передачи; 3 – металлический подслой)

Fig. 1. Nanoscale transmitting lines: а – a slot nanostructure line on graphene; б – an asymmetric nanostructure line on graphene; в – a two-wire line on carbon nanotubes (W is the nanostructure strips 1; D is the distance between them in the case (а) or between the centers of nanotubes in the case (в); h is the thickness of the dielectric substrate 2 (silicon carbide with dielectric constant $\epsilon_r = 9.66$); d is the diameter of the nanotube; l is the length of the transmission line; 3 is the metal sublayer)

Выражения для волнового сопротивления Z_0 , погонной индуктивности L_1 и погонной емкости C_1 в случае щелевой линии получены в работе [10] на основе уравнений классической электродинамики СВЧ и имеют следующий вид:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} \left[(\epsilon_r - 1) \ln \frac{16h}{\pi W} + 2 \ln \frac{4D}{W} \right]^{-1}, \quad (7)$$

$$L_1 = \frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c}, \quad \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}, \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{cZ_0}, \quad (9)$$

где ϵ_0 и μ_0 – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума.

Для несимметричной полосковой линии волновое сопротивление Z_0 находится в виде [11]

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right), \quad (10)$$

а L_1 и C_1 рассчитываются по формулам (8) и (9) соответственно.

Для двухпроводной линии [12]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{2D-d}{d}\right), \quad (11)$$

$$L_1 = \frac{\mu_0\mu_r}{\pi} \ln\left(\frac{2D-d}{d}\right), \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}. \quad (13)$$

В рассматриваемых случаях в качестве примера выбраны углеродные нанотрубки хиральности (9, 0) диаметром $d = 0,704$ нм.

Результаты расчетов по формулам (7)–(13) для некоторых оправданных с технологической точки зрения размеров наномасштабных линий передачи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Волновые характеристики наномасштабных линий передачи с точки зрения классической электродинамики СВЧ

Table 1

Wave characteristics of the nanoscale transmitting lines from a classical microwave electrodynamics point of view

Параметр	Щелевая нанополосковая линия	Несимметричная нанополосковая линия	Двухпроводная линия на углеродных нанотрубках
W , нм	5,0	5,0	–
D , нм	15	–	7,04
h , мкм	1,0	1,0	–
d , нм	–	–	0,704
Z_0 , Ом	13,4	192	572
L_1 , пГн/мкм	0,103	1,48	1,90
C_1 , аФ/мкм	575	40,2	5,80

Наномасштабные линии передач и их волновые характеристики. Выражения (5), (6) для квантов погонной кинетической индуктивности и погонной емкости приведены для одного канала электропроводности. В графеновых лентах и углеродных нанотрубках их четыре – два долинные и два спиновых. Поскольку они параллельны, то результирующая погонная кинетическая индуктивность каждого проводника линии передачи будет в 4 раза меньше, а результирующая погонная квантовая емкость – в 4 раза больше.

На рис. 2 показаны эквивалентные схемы наномасштабных линий передач. Во всех трех случаях $L_1 \ll L_0$, тогда погонная индуктивность этих линий практически определяется кинетической индуктивностью. Полная погонная емкость для щелевой нанополосковой линии и двухпроводной линии на углеродной нанотрубке находится по формуле

$$C_{tot} = \frac{2C_0C_1}{C_1 + 2C_0},$$

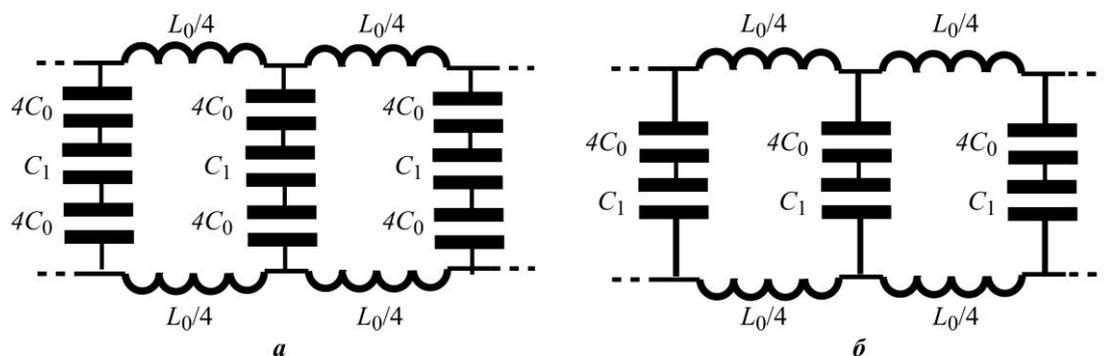


Рис. 2. Эквивалентные схемы наномасштабных линий передачи: а – для щелевой и двухпроводной линий; б – для несимметричной полосковой линии
 Fig. 2. Equivalent schemes of the considered nanoscale transmission lines: a – for slot and two-wire lines; b – for an asymmetric strip line

для несимметричной полосковой линии – по формуле

$$C_{tot} = \frac{4C_0 C_1}{C_1 + 4C_0}.$$

Окончательные выражения для волновых сопротивлений передающих линий имеют следующий вид:

– для щелевой и двухпроводной линий

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{2C_{tot}}};$$

– для несимметричной полосковой линии

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{4C_{tot}}}.$$

Результаты соответствующих расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Волновые характеристики наномасштабных линий передачи с учетом квантово-размерных эффектов

Table 2

Wave characteristics of the nanoscale transmitting lines with account of quantum-dimensional effects

Параметр	Щелевая нанополосковая линия	Несимметричная нанополосковая линия	Двухпроводная линия на углеродных нанотрубках
C_{tot} , аФ/мкм	148	36,5	5,64
Z_0 , кОм	7,35	10,5	37,7
v_{SPP} , 10^5 м/с	9,19	26,2	47,1
λ_{SPP} , нм $\nu = 100$ ТГц	9,19	26,2	47,1
β , 10^{12} с ⁻¹	14,6	14,6	74,4
Λ/λ_{SPP} , нм $\nu = 100$ ТГц	6,85	6,85	1,34

В реальности по наномасштабной линии передачи распространяется плазмон-поляритонная волна, скорость которой согласно рассмотренным двум случаям определяется выражением

$$v_{SPP} = \frac{1}{\sqrt{(L_0/2)/C_{tot}}}$$

или

$$v_{SPP} = \frac{1}{\sqrt{(L_0/4)/C_{tot}}}.$$

Длина этой волны может быть вычислена как $\lambda_{SPP} = v_{SPP} / \nu$, где ν – частота волны. Результаты расчета λ_{SPP} для частоты $\nu = 100$ ТГц также отражены в табл. 2. Сравнение значений Z_0 из табл. 1 и 2 показывает, что существование квантов волновых параметров в наномасштабных линиях передачи приводит к увеличению волнового сопротивления линии на два порядка величины.

Обусловленный наличием квантового сопротивления линии передачи коэффициент затухания в ней плазмон-поляритонной волны как в случае двух нанопроводников (см. рис. 2, а), так и в случае одного нанопроводника (см. рис. 2, б) может быть найден в виде $\beta = 2R_{20} / L_0$. Тогда из формул (3)–(5) с учетом того, что $\sqrt{2m_e E_F} = m_e v_F$, выражения для коэффициента затухания в соответствующих линиях передачи принимают вид

$$\beta = \frac{1}{g_s g_v} \frac{2h}{m_e W^2}, \quad (14)$$

$$\beta = \frac{1}{g_s g_v} \frac{2h}{m_e (\pi d)^2}. \quad (15)$$

Путь, пройденный плазмон-поляритонной волной в линии передачи за время релаксации колебаний $\tau = 1/\beta$, – «длина релаксации» $\Lambda = v_{SPP} \tau$, а ее значение, приведенное к длине данной волны, равно отношению частоты колебаний к коэффициенту затухания:

$$\frac{\Lambda}{\lambda_{SPP}} = \frac{\nu}{\beta}. \quad (16)$$

Результаты вычислений по формулам (14)–(16) приведены в табл. 2. Из них следует, что на частотах порядка 100 ТГц амплитуда плазмон-поляритонной волны в исследуемых наномасштабных линиях передачи даже в режиме баллистического транспорта электронов убывает в $e = 2,72$ раза на расстояниях порядка единиц длин волн. Наибольшее квантовое затухание имеют двухпроводные линии передачи на углеродных нанотрубках.

Резонаторы на наномасштабных линиях передачи и их характеристики. Рассмотренные наномасштабные линии передачи могут быть использованы для создания резонаторов, если выбирать их длину таким образом, чтобы в отрезке линии устанавливалась стоячая плазмон-поляритонная волна. Наименьшее сопротивление постоянному току и, как следствие, наибольшую добротность будут иметь четвертьволновые резонаторы, у которых один конец линии передачи закорочен, а другой разомкнут. При этом

на закороченном конце линии будет пучность тока и узел напряжения, а на разомкнутом конце – узел тока и пучность напряжения. Для четвертьволнового резонатора длина каждого нанопроводника $l = \lambda_{SPP} / 4$, а добротность

$$Q = \frac{Z_0}{R_2}, \quad (17)$$

где $R_2 = R_{20}nl$; n – число нанопроводников в линии передачи. Параметр R_{20} рассчитывается по формуле (3) или (4), а значения Z_0 и R_2 берутся из табл. 2 и 3.

Таблица 3

Характеристики четвертьволновых резонаторов на наномасштабных линиях передачи ($\nu = 100$ ТГц)

Table 3

Characteristics of the quarter-wave resonators based on nanoscale transmitting lines ($\nu = 100$ THz)

Параметр	Щелевая нанополосковая линия	Несимметричная нанополосковая линия	Двухпроводная линия на углеродных нанотрубках
R_2 , кОм	0,46	0,24	2,4
Q	16	44	16
θ	0,20	0,07	0,20

Зная добротность резонатора, можно найти логарифмический декремент затухания в нем плазмон-поляритонных колебаний:

$$\theta = \frac{\pi}{Q}. \quad (18)$$

Результаты вычислений по формулам (17), (18) представлены в табл. 3. Хотя размерное квантование и приводит к увеличению волнового сопротивления наномасштабных линий передачи примерно на два порядка, тем не менее одновременное резкое увеличение квантового сопротивления линии постоянному току вызывает на частотах около 100 ТГц значительное затухание плазмон-поляритонных волн. В результате добротность резонаторов на отрезках рассматриваемых линий оказывается очень маленькой – не превышает нескольких десятков. Более того, приведенные значения добротности таких резонаторов являются завышенными, так как не учитывают диэлектрических потерь и потерь на излучение.

Заключение. Полученные в работе результаты показывают, что на частотах порядка 100 ТГц квантово-размерные эффекты оказывают определяющее влияние на волновые характеристики наномасштабных линий передачи, выполненных из графена и углеродных нанотрубок. Даже в режиме баллистического транспорта при длине проводников линии до 1 мкм амплитуда плазмон-поляритонных волн в них затухает в $e = 2,72$ раза на расстоянии всего в несколько длин волн. Резонаторы, выполненные на отрезках таких линий, имеют добротность, не превышающую несколько десятков единиц.

Таким образом, использование рассмотренных электропроводящих линий передачи в оптическом диапазоне частот неперспективно, но на частотах до нескольких десятков терагерц они могут найти применение.

Литература

1. **Joshi N., Pathak N. P.** Tunable wavelength demultiplexer using modified graphene plasmonic split ring resonators for terahertz communication // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2018. Vol. 28. P. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2017.10.004>
2. **Su W., Geng Z.** Terahertz all-optical logic gates based on a graphene nanoribbon rectangular ring resonator // *IEEE Photonics Journal*. 2018. Vol. 10. Iss. 6. Art. No. 5900608. doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2874507>
3. Terahertz band: The last piece of RF spectrum puzzle for communication systems / **H. Elayan, O. Amin, B. Shihada et al.** // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2020. Vol. 1. P. 1–32. doi: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2019.2953633>
4. **Sun J., Hu F.** Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: A review // *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.* 2020. Vol. 30. Iss. 1. Art. ID: e21983. <https://doi.org/10.1002/mmce.21983>
5. **Burke P. J.** An RF circuit model for carbon nanotubes // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2003. Vol. 2. Iss. 1. P. 55–58. doi: <https://doi.org/10.1109/TNANO.2003.808503>
6. **Landauer R.** Spatial variations of currents and fields due to localized scatterers in metallic conduction // *IBM Journal of Research and Development*. 1957. Vol. 1. Iss. 3. P. 223–231. doi: <https://doi.org/10.1147/rd.13.0223>
7. **Landauer R.** Electrical resistance of disordered one-dimensional lattices // *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. 1970. Vol. 21. Iss. 172. P. 863–867. doi: <https://doi.org/10.1080/14786437008238472>
8. **Фон Клицинг К.** Квантовый эффект Холла / пер. С. М. Апенко // *УФН*. 1986. Т. 150. № 9. С. 107–126. doi: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0150.198609c.0107>
9. **Luryi S.** Quantum capacitance devices // *Appl. Phys. Lett.* 1988. Vol. 52. Iss. 6. P. 501–503. doi: <https://doi.org/10.1063/1.99649>
10. **Вендик О. Г., Данилов И. С., Зубко С. П.** Моделирование волновых параметров узкой щелевой линии передачи на основе сверхпроводящей пленки // *ЖТФ*. 1997. Т. 67. № 9. С. 94–97.
11. **Hammerstadt E. O.** Equations for microstrip circuit design // 1975 5th European Microwave Conference. Hamburg: IEEE, 1975. P. 268–272. doi: <https://doi.org/10.1109/EUMA.1975.332206>
12. **Малков Н. А., Пудовкин А. П.** Устройства сверхвысоких частот: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 92 с.

Статья поступила в редакцию 16.02.2022 г.; одобрена после рецензирования 22.03.2022 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторе

Бразе Рудольф Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), brazhe@ulstu.ru

References

1. Joshi N., Pathak N. P. Tunable wavelength demultiplexer using modified graphene plasmonic split ring resonators for terahertz communication. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2018, vol. 28, pp. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2017.10.004>
2. Su W., Geng Z. Terahertz all-optical logic gates based on a graphene nanoribbon rectangular ring resonator. *IEEE Photonics Journal*, 2018, vol. 10, iss. 6, art. no. 5900608. doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2874507>
3. Elayan H., Amin O., Shihada B., Shubair R. M., Alouini M.-S. Terahertz band: The last piece of RF spectrum puzzle for communication systems. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, vol. 1, pp. 1–32. doi: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2019.2953633>
4. Sun J., Hu F. Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: A review. *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.*, 2020, vol. 30, iss. 1, art. ID: e21983. <https://doi.org/10.1002/mmce.21983>
5. Burke P. J. An RF circuit model for carbon nanotubes. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2003, vol. 2, iss. 1, pp. 55–58. doi: <https://doi.org/10.1109/TNANO.2003.808503>

6. Landauer R. Spatial variations of currents and fields due to localized scatterers in metallic conduction. *IBM Journal of Research and Development*, 1957, vol. 1, iss. 3, pp. 223–231. <https://doi.org/10.1147/rd.13.0223>
7. Landauer R. Electrical resistance of disordered one-dimensional lattices. *Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, 1970, vol. 21, iss. 172, pp. 863–867. doi: <https://doi.org/10.1080/14786437008238472>
8. Von Klitzing K. The quantized Hall effect. *Rev. Mod. Phys.*, 1986, vol. 58, no. 3, pp. 519–531. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.58.519>
9. Luryi S. Quantum capacitance devices. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, vol. 52, iss. 6, pp. 501–503. doi: <https://doi.org/10.1063/1.99649>
10. Vendik O. G., Danilov I. S., Zubko S. P. Modeling the wave parameters of a narrow slotted transmission line based on a superconducting film. *Tech. Phys.*, 1997, vol. 42, iss. 9, pp. 1068–1070. doi: <https://doi.org/10.1134/1.1258767>
11. Hammerstadt E. O. Equations for microstrip circuit design. *1975 5th European Microwave Conference*. Hamburg, IEEE, 1975, pp. 268–272. doi: <https://doi.org/10.1109/EUMA.1975.332206>
12. Malkov N. A., Pudovkin A. P. *Microwave devices*, study guide. Tambov, Tambov State Technical University Publ., 2008. 92 p. (In Russian).

The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 22.03.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the author

Rudolf A. Brazhe – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Physics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), brazhe@ulstu.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>

Расчет и моделирование систем экранирования для защиты сверхпроводниковой электроники от ИК-излучения

Е. И. Малеванная, А. Р. Матанин, В. И. Полозов, А. И. Иванов, А. А. Самойлов, С. П. Бычков, К. М. Моисеев, И. А. Родионов

*Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия*

ei_malevannaya@bmstu.ru

Аннотация. На работу сверхпроводниковых электронных систем существенное влияние оказывает ИК-излучение, поступающее извне. Для защиты сверхпроводниковых схем применяют системы экранирования – несколько вложенных друг в друга экранов, покрытых поглощающими покрытиями. В силу разнообразия используемых материалов и последовательности расположения экранов возникают трудности при выборе наиболее эффективной системы экранирования. В работе приведены расчет на основе теории теплопередачи излучением и результаты моделирования методом конечных элементов нескольких систем экранирования для защиты сверхпроводниковых электронных схем от ИК-излучения. Показано, что основным источником ИК-фотонов в измерительной системе сверхпроводниковой электроники является излучение, распространяющееся по проводам, а также выделяющееся на пассивных элементах схемы и на чипе в виде тепла. Двумя методами определена наиболее эффективная система экранов при различных источниках излучения. Расчет и моделирование показали, что наибольшее влияние на температуру электронной схемы оказывает ближайшая к образцу поверхность – крышка держателя, поэтому ее необходимо делать поглощающей. При этом установлено, что экранирование от ИК-излучения за счет поверхности крышки держателя достаточно. На основе моделирования сформулированы рекомендации по выбору конструкции держателя для электронной схемы: с целью наилучшей защиты образца со сверхпроводниковой электроникой крышка должна покрывать только чип, а зазор между дном и крышкой на держателе не должен превышать 0,1 мм.

Ключевые слова: сверхпроводниковая электроника, ИК-излучение, квазичастицы, экранирование, коэффициент поглощения, теплопередача излучением, метод конечных элементов

Для цитирования: Расчет и моделирование систем экранирования для защиты сверхпроводниковой электроники от ИК-излучения / Е. И. Малеванная, А. Р. Матанин, В. И. Полозов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 517–529. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-517-529>

Original article

Calculation and simulation of shielding systems for the protection of superconducting electronic circuits from IR radiation

E. I. Malevannaya, A. R. Matanin, V. I. Polozov, A. I. Ivanov, A. A. Samoylov, S. P. Bychkov, K. M. Moiseev, I. A. Rodionov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ei_malevannaya@bmstu.ru

Abstract. The operation of superconducting electronic circuits is influenced by IR radiation coming from outside. To protect electronic circuits from radiation, shielding systems consisting of several nested shields covered with absorbing coatings are used. Due to the variety of materials used and of the shields sequence, it becomes difficult to choose the most effective shielding system. In this work, a calculation on a base of radiative heat transfer theory and finite element simulation results of several shielding systems for the protection of superconducting circuits from IR radiation are provided. It was demonstrated that the main source of IR photons in the measuring system of superconducting circuits is radiation propagating along wires, as well as released on passive circuit elements and on a chip in the form of heat. The most effective shielding system for various radiation sources was determined by two methods. Calculation and simulation have shown that the greatest influence on the temperature of the quantum circuit is exerted by the surface closest to the sample – the holder lid; therefore, it must be made absorbing. It has been established that the shielding from IR radiation by means of the holder lid surface is sufficient. Based on the simulation, recommendations for choosing a holder design for a quantum circuit have been formulated: for the best protection of a sample with a superconducting electronic circuit, the lid should cover only the chip and the gap between the holder bottom and the holder lid should not exceed 0.1 mm.

Keywords: superconducting electronic circuits, IR radiation, quasiparticles, shielding, emissivity, radiative heat transfer, finite element modeling

For citation: Malevannaya E. I., Matanin A. R., Polozov V. I., Ivanov A. I., Samoylov A. A., Bychkov S. P., Moiseev K. M., Rodionov I. A. Calculation and simulation of shielding systems for the protection of superconducting electronic circuits from IR radiation. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 517–529. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-517-529>

Введение. Применение сверхпроводниковых электронных схем, например, в высокочувствительных детекторах на основе SQUID [1], вычислителях нового поколения [2] – перспективное направление исследований последних лет. Для стабильной работы электроники на сверхпроводниках помимо криогенных температур (близких к абсолютному нулю) требуется также соблюдение таких условий, как уменьшение флуктуаций внешнего магнитного поля [3], устранение наведенного заряда [3], сохранение постоянства тока и напряжения управляющих и считывающих импульсов и уменьшение времени этих импульсов [4], защита от инфракрасного (ИК) излучения [5–8]. Все эти факторы

приводят к разрушению состояния квантовой суперпозиции системы – декогеренции [3]. Одним из основных источников декогеренции является ИК-излучение, попадающее на образец с электронной схемой, так как мощность, переданная куперовским парам в сверхпроводнике в виде энергии от ИК-фотонов, выше, чем, например, от космического излучения или фоновой радиации (~60 пВт по сравнению с 0,02 пВт) [9]. ИК-фотоны разрушают куперовские пары в сверхпроводнике с образованием квазичастиц, которые при туннелировании через джозефсоновский переход, например, в сверхпроводниковых кубитах могут вызвать как энергетическую релаксацию, так и его дефазировку [4].

До криогенных температур (~0,01 К) сверхпроводниковые электронные устройства охлаждаются с помощью криостата растворения [10], в котором для уменьшения влияния ИК-излучения на электронную схему дополнительно используют экранирование и фильтрацию сигналов в коаксиальных линиях [11–13]. Система экранов состоит из нескольких вложенных друг в друга цилиндров, окружающих держатель образца с электронной схемой. Экраны, а иногда и крышка держателя изнутри покрываются специальными поглощающими ИК-излучение покрытиями [5–8, 11–13]. Однако при многообразии применяемых решений для защиты от ИК-излучения остаются нерешенные вопросы: необходимая конфигурация системы экранирования, требуемое количество экранов, расположение поглощающего покрытия.

В настоящей работе приводятся теоретический расчет и численное моделирование различных систем экранирования, обеспечивающих наиболее эффективную защиту сверхпроводниковых электронных схем от ИК-излучения.

Постановка задачи. При проектировании криостатов растворения требуемая хладопроизводительность каждой ступени учитывает мощность теплового излучения более теплых ступеней, располагающихся выше, и теплопередачу через элементы соединения. Поэтому излучение более теплых ступеней криостата не рассматривается, так как уже учтено [10]. Будем использовать следующие источники ИК-излучения:

- сигнальные коаксиальные СВЧ-линии, по которым ИК-излучение распространяется от верхних ступеней;
- пассивные элементы измерительной схемы, выделяющие тепло за счет джоулева нагрева.

Отметим, что в квантовых схемах (особенно в плавающих трансмонах [14]) имеются элементы, либо не связанные, либо слабо связанные с землей на чипе. Отсюда можно предположить, что основной механизм охлаждения таких элементов схемы – потеря энергии посредством излучения, т. е. сам образец является источником тепла, которое нужно отводить от него максимально эффективно.

Таким образом, при постановке задачи расчета экранирования необходимо рассмотреть две модели: образец с квантовой схемой, являющийся источником излучения (это, по сути, имитация его охлаждения в криостате); источник излучения – элемент измерительной схемы типа фильтра или разъема, с помощью которого происходит присоединение кабеля к плате. При прохождении сигнала по всем элементам измерительной схемы происходит его частичная потеря: часть сигнала рассеивается в проводах, а часть выделяется на пассивных элементах в местах соединений проводов и на чипе в виде тепла. Потерянный сигнал вычисляется как разность между тем, что посылается с генератора импульсов, и тем, что поступает на анализатор спектра. С учетом потерь в проводах рассчитанная мощность тепловыделения составляет $3,45 \cdot 10^{-9}$ Вт, что на несколько порядков меньше хладопроизводительности нижней ступени криостата, равной $12 \cdot 10^{-6}$ Вт [15]. Предположим, что вся эта рассчитанная мощность и есть мощность тепловыделения на чипе как максимально возможная.

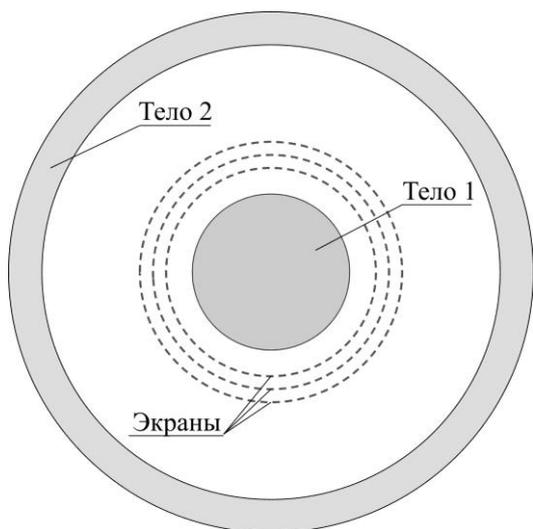


Рис. 1. Расчетная схема теплопередачи излучением в системе цилиндрических тел при произвольном количестве экранов

Fig. 1. Calculation scheme of heat transfer by radiation in a system of cylindrical bodies in the presence of an arbitrary number of screens

Расчет на основе теории теплопередачи излучением. Результирующий поток излучения между двумя телами, разделенными произвольным количеством экранов (рис. 1), вычисляется по формуле [16]

$$Q_{1,2} = c_0 A_{1,2} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана – Больцмана; F_1 – площадь тела 1; T_1, T_2 – температура тел 1 и 2;

$A_{1,2} = \left[\frac{1}{A_{1,2}} + \sum_{i=1}^n \frac{F_1}{F_{3,i}} \left(\frac{2}{A_{3,i}} - 1 \right) \right]^{-1}$ – приведенный коэффициент поглощения системы с

учетом экранов; $A_{1,2} = \left[\frac{1}{A_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right) \right]^{-1}$ –

приведенный коэффициент излучения между телами 1 и 2.

Коэффициенты излучения нижней поверхности (кремниевая подложка, $A_{Si} = 0,77$) и верхней поверхности (алюминиевая пленка, $A_{Al} = 0,057$) различны, поэтому в расчетах необходимо учесть тепловыделение с обеих сторон чипа. Тогда формула (1) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} Q_{1,2} = Q_{1,2в} + Q_{1,2н} &= c_0 A_{1,2в} F_{1в} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + c_0 A_{1,2н} F_{1н} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \\ &= c_0 (A_{1,2в} F_{1в} + A_{1,2н} F_{1н}) \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

При известной мощности тепловыделения $Q_{1,2}$ экранирование допускается сравнивать между собой по минимально достижимой температуре тела 1 в состоянии теплового равновесия. Из формулы (2) выразим температуру тела 1 при отсутствии экранов в системе:

$$T_1 = 100 \sqrt[4]{\frac{Q_{1,2}}{c_0 (A_{1,2в} F_{1в} + A_{1,2н} F_{1н})} + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}. \quad (3)$$

Аналогично, комбинируя формулы (1) и (2), получаем выражение для температуры тела 1 в системе при наличии экранов:

$$T_1 = 100 \sqrt[4]{\frac{Q_{(1,2)э}}{c_0 (A_{1,2э,в} F_{1в} + A_{1,2э,н} F_{1н})} + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}. \quad (4)$$

Для расчета неизвестной температуры образца с квантовой схемой помимо мощности тепловыделения необходимо знать коэффициенты излучения (коэффициент поглощения, или степень черноты) всех поверхностей. Также по этому параметру можно определить, какое покрытие, поглощающее ИК-излучение, будет наиболее эффективно работать.

Измерение коэффициента излучения. Для определения коэффициента излучения воспользуемся методом двойного измерения температур: температура образца с покрытием измеряется термопарой и с помощью тепловизора с установленным коэффициентом излучения. Реальный коэффициент излучения образца вычисляется по формуле Аксенова:

$$A_{\text{реал}} = \frac{A_{\text{уст}} \left[\left(\frac{T_{\text{изм}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right]}{\left(\frac{T_{\text{терм}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4},$$

где $A_{\text{уст}}$ – установленное на тепловизоре значение коэффициента излучения; $T_{\text{изм}}$ – температура, измеренная тепловизором; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; $T_{\text{терм}}$ – температура, измеренная термопарой.

В качестве поглощающих ИК-излучение покрытий применяют различные промышленно выпускаемые смолы [5–8, 11–13, 17], такие как Stycast 2850 FT, Marconi LAO 5, Eccosorb CR-series и другие, отдельно или в сочетании с дополнительными частицами на их поверхности, например с порошком SiC с разным размером частиц, углем или графитовой пылью. Для некоторых из рассмотренных материалов в литературе приведены значения эффективности поглощения в ИК-диапазоне спектра. Для сравнения и дальнейших расчетов необходимо измерить коэффициент поглощения наиболее часто встречающихся в экранировании покрытий. Из промышленно выпускаемых смол для измерения взяты Eccosorb CR-110, Eccosorb CR-124 и Stycast 2850 FT как в чистом виде, так и в разных комбинациях с гранулами SiC размером 0,5 и 1,0 мм промышленного производства и активированным углем в виде мелкодисперсного порошка с размером частиц ~0,15 мм (производства Sigma Aldrich). Смола наносится на образцы из медной фольги размером 30 × 30 мм, дополнительные частицы равномерно распределяются по поверхности для создания рельефа. Далее образцы просушиваются для затвердевания смолы, а затем снова покрываются слоем смолы для фиксации частиц. Если последним слоем наносится уголь, то он смолой уже не покрывается. Приведем результаты измерений степени черноты для пяти покрытий с наибольшим коэффициентом излучения:

Покрытие	Степень черноты
Stycast, SiC 0,5 мм, Stycast, уголь активированный.....	0,952
Stycast, SiC 1 мм, Stycast, уголь активированный.....	0,948
Stycast.....	0,943
Stycast, уголь активированный	0,940
Stycast, SiC 1 мм, Stycast, SiC 0,5 мм, Stycast, уголь активированный	0,931

Также измерены коэффициенты излучения поверхностей без покрытия – позолоченных элементов криостата ($A_{\text{Au}} = 0,048$) и медного основания экранов ($A_{\text{Cu}} = 0,013$).

Конфигурации экранирования. Для расчета взято несколько вариантов экранирования с постепенно усложняющейся конструкцией. Порядок расчета определяется методом покоординатной оптимизации Гаусса – Зейделя, где каждый следующий эле-

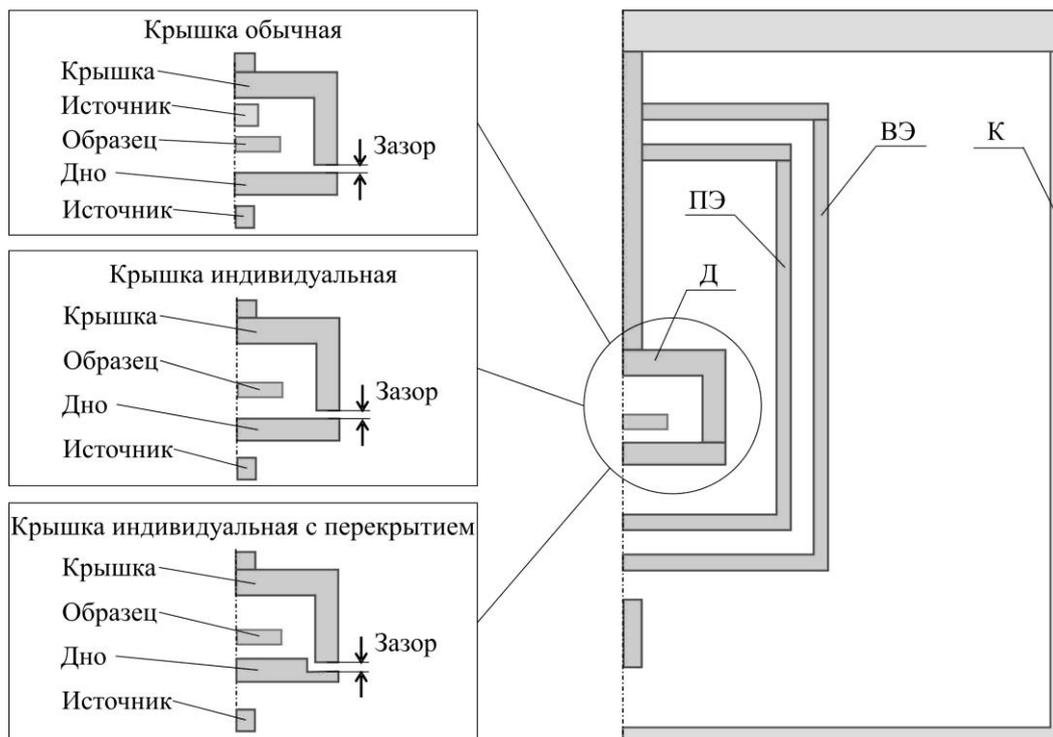


Рис. 2. Система экранирования
Fig. 2. Shielding system

мент конструкции выбирается таким образом, чтобы температура образца была минимальной. Принята следующая система обозначений в наборе экранов (рис. 2): Д – держатель; ПЭ – первый экран; ВЭ – второй экран; К – кожух (оболочка) нижней плиты криостата. Обозначения поверхностей этих элементов: 0 – поверхности без покрытия с двух сторон; 1Ч – черное (поглощающее) покрытие с внутренней стороны; 2Ч – поглощающее покрытие с внешней стороны; 3Ч – поглощающее покрытие с обеих сторон. В таблице представлен план проведения расчетов. Знак «_» означает, что выбор варианта исполнения элемента экранирования определяется предыдущими измерениями.

План проведения расчетов конфигурации экранирования
Plan for conducting calculations of the shielding configuration

№ п/п	Конфигурация экранирования	Порядок расчета
1	Д0К0	Исполнение кожуха (оболочки) нижней ступени криостата
2	Д0К1Ч	
3	Д1ЧК_	Сравнение с предыдущими измерениями. Выбор исполнения крышки держателя
4	Д2ЧК_	
5	Д3ЧК_	
6	Д ПЭ0К	Сравнение с предыдущими измерениями. Решение вопроса об установке экрана, выбор его конструктивного исполнения
7	Д ПЭ1ЧК_	
8	Д ПЭ2ЧК_	
9	Д ПЭ3ЧК_	
10	Д ПЭ ВЭ0К	Сравнение с предыдущими измерениями. Решение вопроса об установке второго экрана, выбор его конструктивного исполнения
11	Д ПЭ ВЭ1ЧК_	
12	Д ПЭ ВЭ2ЧК_	
13	Д ПЭ ВЭ3ЧК_	

Численное моделирование систем экранирования методом конечных элементов.

Для сравнения с теоретическими расчетами проведено численное моделирование систем экранирования методом конечных элементов. Суть моделирования заключается в построении распределения температуры в системе криостат – экраны – образец. Для упрощения модели рассмотрена двумерная осесимметричная задача (см. рис. 2). Элементам модели назначаются свойства соответствующих материалов, ставятся граничные и начальные условия, затем начинается процесс вычисления. По вычисленной температуре образца делается вывод об эффективности той или иной системы экранирования.

Допущения, принятые при расчете и моделировании, должны быть одинаковыми. Поскольку при теоретических расчетах не учитывается охлаждение образца посредством теплопроводности, в модели это также не учитывается, так как нет непосредственного контакта образца и держателя. При этом важно, как охлаждаются экраны, поэтому охлаждение экранов посредством теплопроводности учитывается.

Моделирование показывает, что экраны и держатель практически достигают температуры нижней плиты криостата, что подтверждается непосредственным измерением температуры экранов в криостате. Следовательно, теплообменом излучением между держателем, окружающими его экранами и оболочкой криостата можно пренебречь. Тогда, если рассматриваем задачу, когда образец с квантовой схемой является источником излучения, тело 1 – образец, тело 2 – ближайшая к образцу поверхность. В задаче, где имеется внешний относительно держателя источник излучения, тело 1 – образец, тело 2 – источник, держатель и экраны – экраны между этими телами. Поэтому расчет будет проводиться по разным формулам: по (3) – для первой из обозначенных задач, по (4) – для второй.

Результаты и их обсуждение. Источник излучения – квантовая схема. В данной задаче мощность тепловыделения на чипе в свойствах модели устанавливается равной $3,45 \cdot 10^{-9}$ Вт, температура тела 2 равна 0,01 К. Поток излучения – от образца в окружающее пространство. На рис. 3, а представлены результаты вычисления температуры образца с квантовой схемой посредством моделирования и путем теоретического расчета для различных конфигураций экранирования. Наибольшее влияние на достижение образцом минимальной температуры оказывает ближайшая к образцу поверхность – крышка держателя, поэтому ее поверхность необходимо делать поглощающей. В теоретических расчетах невозможно оценить влияние конфигураций экранов, поскольку определяющим параметром при расчетах оказывается степень черноты поверхности держателя. Согласно графикам модель адекватно описывает распространение излучения и хорошо согласуется с теоретическим расчетом (среднее расхождение 6,1 %). Таким образом, моделирование показало, что система экранирования Д1ЧК1Ч, будучи более простой, обеспечивает меньшую температуру образца.

Источник излучения – элемент измерительной схемы типа фильтра. В данной задаче для расчетов температура источника в модели устанавливается равной 3,17 К исходя из максимальной мощности излучения в системе $3,45 \cdot 10^{-9}$ Вт и площади поверхности фильтра, поток излучения – от фильтра к образцу.

Результаты расчетов (рис. 3, б) показывают, что при наличии внешнего источника излучения для достижения образцом минимальной температуры важно, чтобы либо внешняя поверхность держателя была отражающей, а внутренняя – поглощающей, либо держатель был поглощающий с двух сторон. Также из рисунка видно, что добавление экранов не уменьшает значительно температуру образца. Следовательно, можно выбрать наиболее простое экранирование – Д1ЧК1Ч или Д3ЧК1Ч.

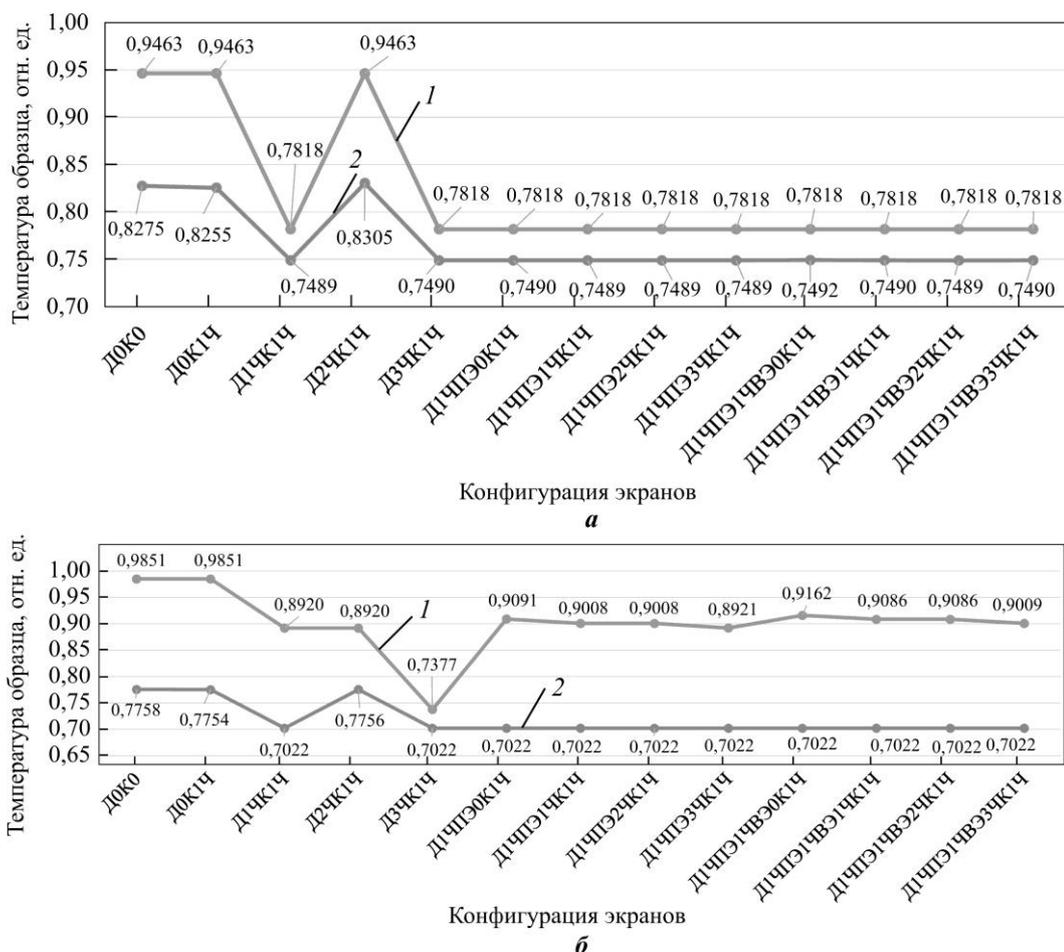


Рис. 3. Температура образцов в зависимости от конфигураций экранов: а – источник излучения – квантовая система; б – внешний источник излучения типа фильтра (1 – расчет; 2 – моделирование)
 Fig. 3. Sample temperature for different shielding configurations: а – the radiation source is a quantum circuit; б – an external radiation source such as a filter (1 – theoretical calculation; 2 – simulation)

Влияние конструкции держателя и зазора в нем. Держатель является основным элементом системы экранирования. Важно определиться с тем, каким образом его нужно спроектировать, чтобы квантовая схема была максимально защищена от поступающего излучения. Крышка может быть общей на весь держатель вместе с чипом, платой и разъемами, а также индивидуальной, прикрывающей только образец с квантовой схемой. Рассмотрены три варианта и соответствующие им модели (см. рис. 2):

- крышка обычная – источник излучения типа разъема находится внутри держателя рядом с образцом, также имеется внешний источник излучения типа фильтра, что соответствует крышке, которая покрывает чип вместе с платой и разъемами;
- крышка индивидуальная – источник излучения находится за пределами держателя. Это имитация случая, когда крышка закрывает только образец;
- крышка индивидуальная с перекрытием – имеется дополнительная ступенька для затруднения прохождения излучения сквозь щель (тоже является вариантом индивидуальной крышки для чипа).

Зазор в моделировании варьируется от 0 до 1 мм с шагом 0,1 мм. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

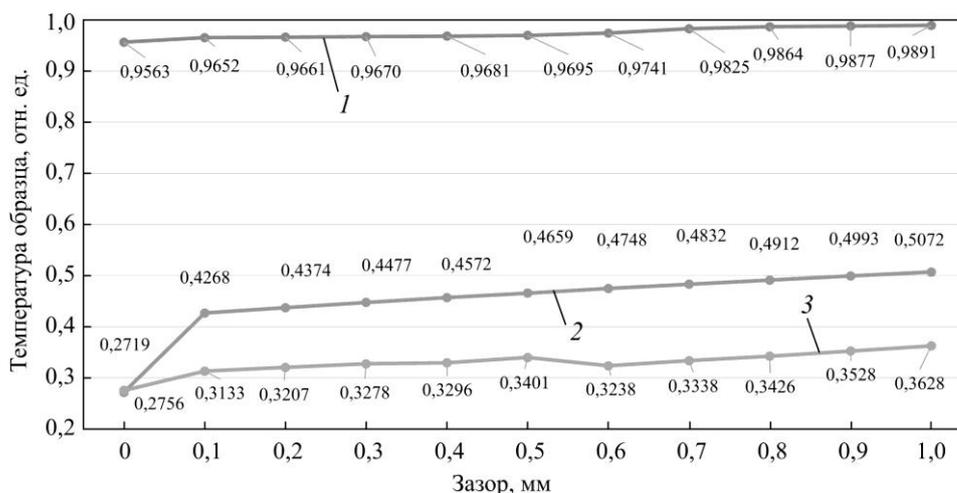


Рис. 4. Температура образца в зависимости от величины зазора в держателе для разного конструктивного исполнения крышки: 1 – крышка обычная; 2 – крышка индивидуальная; 3 – крышка индивидуальная с перекрытием

Fig. 4. Sample temperature depending on the size of the gap in the holder for different designs of the lid: 1 – the lid is normal; 2 – the lid is individual; 3 – individual lid with overlap

Таким образом, при использовании обычной крышки температура образца практически вдвое выше, чем при индивидуальном экранировании. Повышение температуры в зависимости от зазора в держателе происходит плавно. Если выбирать индивидуальную крышку для чипа, то необходимо обеспечивать зазор между крышкой и держателем не более 0,1 мм. Исполнение индивидуальной крышки с перекрытием обеспечивает более низкие температуры образца – почти на 26 % ниже, чем при обычной индивидуальной крышке.

Заключение. Проведенные расчеты и моделирование показали следующее:

1. Наиболее значимой с точки зрения более эффективного охлаждения образца является самая близкая к нему поверхность. В рассмотренном случае – крышка держателя образца. Для достижения более низкой температуры образца внутреннюю поверхность крышки необходимо делать поглощающей.

2. При наличии внешнего источника излучения поверхность держателя, обращенная к источнику излучения, должна быть поглощающей согласно расчетам, однако моделирование показывает, что таких же низких температур образца можно добиться и с отражающей поверхностью. Данный результат требует экспериментальной проверки.

3. Как для более эффективного охлаждения образца, так и для защиты от внешних источников излучения дополнительные экраны вокруг держателя являются избыточными. Экранирования за счет самого держателя достаточно.

4. Крышку держателя следует изготавливать не в виде общей крышки, закрывающей образец, плату и разъемы, а в виде индивидуального поглощающего экрана. Это позволит оградить чип с квантовой схемой от излучения от разъемов и снизить его температуру примерно вдвое (на 53 %).

5. Конструкция держателя должна быть реализована таким образом, чтобы зазор между дном и крышкой был не более 0,1 мм для индивидуальных крышек, при этом наличие перекрытия между дном и крышкой позволяет дополнительно снизить температуру образца практически на 26 %.

Литература

1. *Sawicki M., Stefanowicz W., Ney A.* Sensitive SQUID magnetometry for studying nano-magnetism // *Semicond. Sci. Technol.* 2021. Vol. 26. No. 6. Art. No. 064006. doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/6/064006>
2. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor / *F. Arute, K. Arya, R. Babbush et al.* // *Nature.* 2019. Vol. 574. P. 505–510. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
3. A quantum engineer's guide to superconducting qubits / *P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan et al.* // *Appl. Phys. Rev.* 2019. Vol. 6. Iss. 2. Art. No. 021318. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5089550>
4. Banishing quasiparticles from Josephson-junction qubits: why and how to do it / *K. M. Lang, S. Nam, J. Aumentado et al.* // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* 2003. Vol. 13. Iss. 2. P. 989–993. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.814121>
5. Optimization of infrared and magnetic shielding of superconducting TiN and Al coplanar microwave resonators / *J. M. Kreikebaum, A. Dove, W. Livingston et al.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2016. Vol. 29. No. 10. Art. No. 104002. doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/10/104002>
6. Minimizing quasiparticle generation from stray infrared light in superconducting quantum circuits / *R. Barends, J. Wenner, M. Lenander et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99. Iss. 11. Art. No. 113507. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3638063>
7. Cavity attenuators for superconducting qubits / *Z. Wang, S. Shankar, Z. K. Mineev et al.* // *Phys. Rev. Applied.* 2019. Vol. 11. Iss. 1. Art. No. 014031. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014031>
8. Protecting superconducting qubits from radiation / *A. D. Córcoles, J. M. Chow, J. M. Gambetta et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99. Iss. 18. Art. No. 181906. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3658630>
9. *Martinis J. M., Ansmann M. A., Aumentado J.* Energy decay in superconducting Josephson-junction qubits from nonequilibrium quasiparticle excitations // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 103. Iss. 9. Art. No. 097002. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.097002>
10. Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems / *S. Krinner, S. Storz, P. Kurpiers et al.* // *EPJ Quantum Technology.* 2019. Vol. 6. Art. No. 2. doi: <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0>
11. Experimental realization of a protected superconducting circuit derived from the $0-\pi$ qubit / *A. Gyenis, P. S. Mundada, A. Di Paolo et al.* // *PRX Quantum.* 2021. Vol. 2. Iss. 1. Art. No. 010339. doi: <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.010339>
12. New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds / *A. P. M. Place, L. V. H. Rodgers, P. Mundada et al.* // *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12. Art. No. 1779. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22030-5>
13. Microscopic relaxation channels in materials for superconducting qubits / *A. Premkumar, C. Weiland, S. Hwang et al.* // *Commun. Mater.* 2021. Vol. 2. Art. No. 72. doi: <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00174-7>
14. Two-dimensional hard-core Bose–Hubbard model with superconducting qubits / *Y. Yanay, J. Braumüller, S. Gustavsson et al.* // *npj Quantum Inf.* 2020. Vol. 6. Art. No. 58. doi: <https://doi.org/10.1038/s41534-020-0269-1>
15. BF-LD-series cryogen-free dilution refrigerator system user manual, version 1.5.0, 2016 // BlueFors Cryogenics [Электронный ресурс]. URL: <https://bluefors.com/> (дата обращения: 05.05.2022).
16. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
17. *Bründermann E., Hübbers H.-W., Kimmitt M. F.* Terahertz techniques. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. XXII, 386 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02592-1>

Статья поступила в редакцию 24.02.2022 г.; одобрена после рецензирования 22.03.2022 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторах

Малеванная Елизавета Ильинична – аспирант кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Функциональные микро- и наносистемы» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18), ei_malevannaya@bmstu.ru

Матанин Алексей Романович – аспирант кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Функциональные микро- и наносистемы» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18), armatanin@bmstu.ru

Полозов Виктор Иванович – младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Функциональные микро- и наносистемы» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18), viktor.polozov@phystech.edu

Иванов Антон Иванович – ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Функциональные микро- и наносистемы» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18), aivanov@bmstu.ru

Самойлов Андрей Александрович – магистрант кафедры физики Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), лаборант Научно-образовательного центра «Функциональные микро- и наносистемы» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18), samoylova@bmstu.ru

Бычков Сергей Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), bychkov@bmstu.ru

Моисеев Константин Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), k.moiseev@bmstu.ru

Родионов Илья Анатольевич – кандидат технических наук, директор Научно-образовательного центра «Функциональные микро- и наносистемы» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (Россия, 105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18), irodionov@bmstu.ru

References

1. Sawicki M., Stefanowicz W., Ney A. Sensitive SQUID magnetometry for studying nano-magnetism. *Semicond. Sci. Technol.*, 2021, vol. 26, no. 6, art. no. 064006. doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/6/064006>
2. Arute F., Arya K., Babbush R., Bacon D., Bardin J. C., Barends R., Biswas R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 2019, vol. 574, pp. 505–510. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
3. Krantz P., Kjaergaard M., Yan F., Orlando T. P., Gustavsson S., Oliver W. D. A quantum engineer's guide to superconducting qubits. *Appl. Phys. Rev.*, 2019, vol. 6, iss. 2, art. no. 021318. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5089550>
4. Lang K. M., Nam S., Aumentado J., Urbina C., Martinis J. M. Banishing quasiparticles from Josephson-junction qubits: why and how to do it. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, vol. 13, iss. 2, pp. 989–993. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.814121>
5. Kreikebaum J. M., Dove A., Livingston W., Kim E., Siddiqi I. Optimization of infrared and magnetic shielding of superconducting TiN and Al coplanar microwave resonators. *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, vol. 29, no. 10, art. no. 104002. doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/10/104002>

6. Barends R., Wenner J., Lenander M., Chen Y., Bialczak R. C., Kelly J., Lucero E. et al. Minimizing quasiparticle generation from stray infrared light in superconducting quantum circuits. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 99, iss. 11, art. no. 113507. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3638063>
7. Wang Z., Shankar S., Mineev Z. K., Campagne-Ibarcq P., Narla A., Devoret M. H. Cavity attenuators for superconducting qubits. *Phys. Rev. Applied*, 2019, vol. 11, iss. 1, art. no. 014031. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014031>
8. Córcoles A. D., Chow J. M., Gambetta J. M., Rigetti Ch., Rozen J. R., Keefe G. A., Rothwell M. B., Ketchen M. B., Steffen M. Protecting superconducting qubits from radiation. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 99, iss. 18, art. no. 181906. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3658630>
9. Martinis J. M., Ansmann M. A., Aumentado J. Energy decay in superconducting Josephson-junction qubits from nonequilibrium quasiparticle excitations. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, vol. 103, iss. 9, art. no. 097002. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.097002>
10. Krinner S., Storz S., Kurpiers P., Magnard P., Heinsoo J., Keller R., Lütolf J., Eichler C., Wallraff A. Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems. *EPJ Quantum Technology*, 2019, vol. 6, art. no. 2. doi: <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0>
11. Gyenis A., Mundada P. S., Di Paolo A., Hazard Th. M., You X., Schuster D. I., Koch J., Blais A., Houck A. A. Experimental realization of a protected superconducting circuit derived from the $0-\pi$ qubit. *PRX Quantum*, 2021, vol. 2, iss. 1, art. no. 010339. doi: <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.010339>
12. Place A. P. M., Rodgers L. V. H., Mundada P., Smitham B. M., Fitzpatrick M., Leng Zh., Premkumar A., Bryon J. et al. New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds. *Nat. Commun.*, 2021, vol. 12, art. no. 1779. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22030-5>
13. Premkumar A., Weiland C., Hwang S., Jäck B., Place A. P. M., Waluyo I., Hunt A., Bisogni V. et al. Microscopic relaxation channels in materials for superconducting qubits. *Commun. Mater.*, 2021, vol. 2, art. no. 72. doi: <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00174-7>
14. Yanay Y., Braumüller J., Gustavsson S., Oliver W. D., Tahan Ch. Two-dimensional hard-core Bose-Hubbard model with superconducting qubits. *npj Quantum Inf.*, 2020, vol. 6, art. no. 58. doi: <https://doi.org/10.1038/s41534-020-0269-1>
15. BF-LD-series cryogen-free dilution refrigerator system user manual, version 1.5.0, 2016. *BlueFors Cryogenics*. Available at: <https://bluefors.com/> (accessed: 05.05.2022).
16. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Heat transfer*, study guide. 4th ed., upd. and rev. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. (In Russian).
17. Bründermann E., Hübers H.-W., Kimmitt M. F. *Terahertz techniques*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012. xxii, 386 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02592-1>

The article was submitted 24.02.2022; approved after reviewing 22.03.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the authors

Elizaveta I. Malevannaya – PhD student of the Electronic Technologies in Mechanical Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya st., 5, bld. 1), Junior Researcher of the Scientific and Educational Center “Functional Micro- and Nanosystems”, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105082, Moscow, Rubtsovskaya naberezhnaya, 2/18), ei_malevannaya@bmstu.ru

Aleksey R. Matanin – PhD student of the Electronic Technologies in Mechanical Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya st., 5, bld. 1), Junior Researcher of the Scientific and Educational Center “Functional Micro- and Nanosystems”, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105082, Moscow, Rubtsovskaya naberezhnaya, 2/18), armatanin@bmstu.ru

Viktor I. Polozov – Junior Researcher of the Scientific and Educational Center “Functional Micro- and Nanosystems”, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105082, Moscow, Rubtsovskaya naberezhnaya, 2/18), viktor.polozov@phystech.edu

Anton I. Ivanov – Leading Researcher of the Scientific and Educational Center “Functional Micro- and Nanosystems”, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105082, Moscow, Rubtsovskaya naberezhnaya, 2/18), aivanov@bmstu.ru

Andrey A. Samoylov – Master's degree student of the Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya st., 5, bld. 1), Laboratory Assistant of the Scientific and Educational Center “Functional Micro- and Nanosystems”, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105082, Moscow, Rubtsovskaya naberezhnaya, 2/18), samoylova@bmstu.ru

Sergey P. Bychkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronic Technologies in Mechanical Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya st., 5, bld. 1), bychkov@bmstu.ru

Konstantin M. Moiseev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronic Technologies in Mechanical Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya st., 5, bld. 1), k.moiseev@bmstu.ru

Ilya A. Rodionov – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Educational Center “Functional Micro- and Nanosystems”, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105082, Moscow, Rubtsovskaya naberezhnaya, 2/18), irodionov@bmstu.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 004.031.2
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-530-538

**Разработка высокоскоростного радиочастотного
модуля управления беспроводной связью
с защитой от дублирования пакетов**

Н. И. Егоров

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

dr.kolya-97@yandex.ru

Аннотация. Одна из основных особенностей проектирования систем на основе Интернета вещей – соединение большого количества различных устройств в единую сеть посредством беспроводной связи. При этом возникает проблема защиты информации от несанкционированного доступа. В работе предложено программное решение на основе протокола Enhanced ShockBurst. Формализована задача передачи данных с защитой пакетов от дублирования. Разработаны модели защищенной передачи данных и команд в виде конечных автоматов, а также основанные на них алгоритмы. Показано, что данные алгоритмы базируются на защите пакетов от дублирования с применением идентификатора пакета и циклического контроля по избыточности, а также на системе команд. Разработано программное решение в виде модуля управления беспроводной связью с применением созданных моделей и алгоритмов. Для его исследования проведено имитационное моделирование в среде AnyLogic. Выполнено сравнение полученных данных с аналогами в виде модулей XBee Series 2 и модуля CC2650MODA. Предложенное решение улучшает среднее значение процента выполнения команд на 8,71 % по сравнению с модулями XBee Series 2 и увеличивает скорость передачи данных в 2 раза и дальность действия примерно в 3,7 раза по сравнению с модулем CC2650MODA.

Ключевые слова: Интернет вещей, IoT, высокоскоростной радиочастотный модуль, защита от дублирования пакетов, идентификатор пакета, циклический контроль по избыточности

Для цитирования: Егоров Н. И. Разработка высокоскоростного радиочастотного модуля управления беспроводной связью с защитой от дублирования пакетов // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 530–538. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-530-538>

© Н. И. Егоров, 2022

Original article

Development of high-speed radiofrequency wireless control module with anti-replay protection

N. I. Egorov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

dr.kolya-97@yandex.ru

Abstract. One of main advantages of Internet of Things (IoT) system is an opportunity to link many various devices in one network through wireless communication. However, the key IoT problem is a data protection against cyberattacks. In this work, a software solution based on Enhanced ShockBurst protocol is proposed. The task of data transmission with anti-replay protection was formalized. Models of protected data and commands transmission in the form of finite state machines were developed. Algorithms stemming from these models were created. It was shown that these algorithms are based on anti-replay protection using package ID and cyclic redundancy check along with command system developed by the author. Software of the wireless control module has been created on the basis of developed models and algorithms. Simulation modelling in AnyLogic was used for this solution research. Its results are compared with the results of prototypes: XBee Series 2 modules and CC2650MODA module. The proposed solution improves an average command execution percentage by 8.71 % in comparison with the modules XBee Series 2, doubles a data transmission speed and increases a range by about 3.7 times in comparison with the module CC2650MODA.

Keywords: Internet of Things, IoT, high-speed radiofrequency module, anti-replay protection, package ID, cyclic redundancy check

For citation: Egorov N. I. Development of high-speed radiofrequency wireless control module with anti-replay protection. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 530–538. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-530-538>

Введение. Интернет вещей применяется в системах «умный дом», состоящих из устройств, имеющих доступ в Интернет, автоматизированной системы управления для домов и надежной системы управления энергопотреблением, в интеллектуальных системах мониторинга состояния здоровья, включающих в себя программируемое оборудование малых размеров и устройства для поддержания здоровья, улучшения качества жизни пожилых людей и людей с ограниченными возможностями, а также в транспортной сфере [1]. Основная проблема для дальнейшего распространения Интернета вещей – защита информации от несанкционированного доступа [2].

В настоящей работе предлагается решение на основе протокола Enhanced ShockBurst [3], позволяющее обеспечить не только защиту от дублирования пакетов, в которых хранятся данные, но и двукратное увеличение скорости передачи данных и дальности действия сети по сравнению с существующими аналогами.

Формализация задачи защищенной передачи данных в протоколе беспроводной связи. Для разработки программной части решения выбран протокол Enhanced ShockBurst характеризующийся высокой скоростью передачи данных (2 Мбит/с), большой дальностью действия (до 1100 м), а также возможностью регулирования как

скорости передачи данных, так и дальности действия протокола. Кроме того, он позволяет защитить пакеты от дублирования [3]. Перед тем как начать разработку решения, необходимо формализовать задачу защищенной передачи данных (защита пакетов от дублирования) в протоколе беспроводной связи.

Пусть по протоколу беспроводной связи передается пакет, представляющий собой пару слов $\langle a, b \rangle$, где a – информационная часть пакета, содержащая вводимые пользователем данные; b – его служебная часть, формируемая согласно стандарту используемого протокола и содержащая поля PID (идентификатор пакета) и CRC (циклический контроль по избыточности) [4, р. 70–71]. При защищенной передаче пакета по каналу ch должно выполняться следующее условие: если передаются два пакета $p_i, p_j \in P$ в одном канале ch и при этом $p_i \neq p_j$, то должны $\exists PID_i, PID_j : (PID_i \neq PID_j) \vee (CRC_i \neq CRC_j)$ [3, р. 28–30]. Исходя из приведенной формулировки задачи, необходимо обеспечить защиту данных на основании идентификации пакета и циклического контроля по избыточности. Для этого нужно создать функцию, которая позволила бы ее оценить.

Так как на вход будут подаваться текстовые сообщения и при этом не все из них будут переданы, то наилучшим решением будет функция, включающая в себя соотношение количества переданных сообщений к общему количеству отправленных сообщений. Поэтому функция будет иметь вид

$$f = \sum_{i=1}^k \frac{\sum_{j=1}^i n_{j \text{ пер}}}{n_{i \text{ отпр}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где k – общее количество отправок сообщений; $n_{j \text{ пер}}$ – количество переданных сообщений во время j -й отправки; $n_{j \text{ отпр}}$ – общее количество отправленных сообщений во время j -й отправки; $n_{i \text{ отпр}}$ – общее количество отправленных сообщений во время i -й отправки.

У функции f , описанной в формуле (1), максимальное значение равно 100 %, а теоретически достижимым значением является 90 %. Таким образом, задача защищенной передачи в протоколе беспроводной связи состоит в том, чтобы привести среднее значение процента переданных сообщений к теоретически достижимому.

Разработка моделей и алгоритмов защищенной передачи данных и защищенной передачи команд. Для решения поставленной задачи необходимо построить математическую модель для защищенной передачи данных. Для ее представления используется конечный автомат [5, с. 19–22]. Обозначим поля преамбулы Pr , адреса $Addr$, длины полезной нагрузки $PLLen$, идентификатора пакета PID , автоматического подтверждения $AutoACK$, полезной нагрузки PL и поле контрольной суммы CRC [3, р. 28–30, 33–34].

Конечный автомат защищенной передачи данных записывается в виде [5, с. 19–22]

$$A_{\text{защ. пер}} = (S_{\text{защ. пер}}, X_{\text{защ. пер}}, Y_{\text{защ. пер}}, \delta_{\text{защ. пер}}, \lambda_{\text{защ. пер}}, S_{0\text{защ. пер}}),$$

где $S_{\text{защ. пер}}$ – конечное множество состояний, включающее в себя 15 состояний, описанных в [3]; $X_{\text{защ. пер}}$ – конечный входной алфавит ($X_{\text{защ. пер}} = \{0, 1\}$), так как на вход по-

даются текстовые сообщения, переведенные в двоичный код); $Y_{\text{защ. пер}}$ – конечный выходной алфавит, представляющий собой пакет, состоящий из информационной части a и служебной части b [4, с. 70–71], причем

$$a = \{PL\}, \quad (2)$$

$$b = \{Pr, Addr, PLLen, PID, AutoACK, CRC\}. \quad (3)$$

Таким образом, конечный выходной алфавит $Y_{\text{защ. пер}}$ представляет собой упорядоченные пары слов $\langle a, b \rangle$, которые описываются выражениями (2), (3) [4, с. 70–71]. Входом для данного конечного автомата является адрес $Addr$, а выходом – пакет $Packet$. Для упрощения построения конечного автомата добавлены флаги, которые созданы исходя из описания, представленного в работе [3]. Разработанный конечный автомат для защищенной передачи данных представлен на рис. 1.

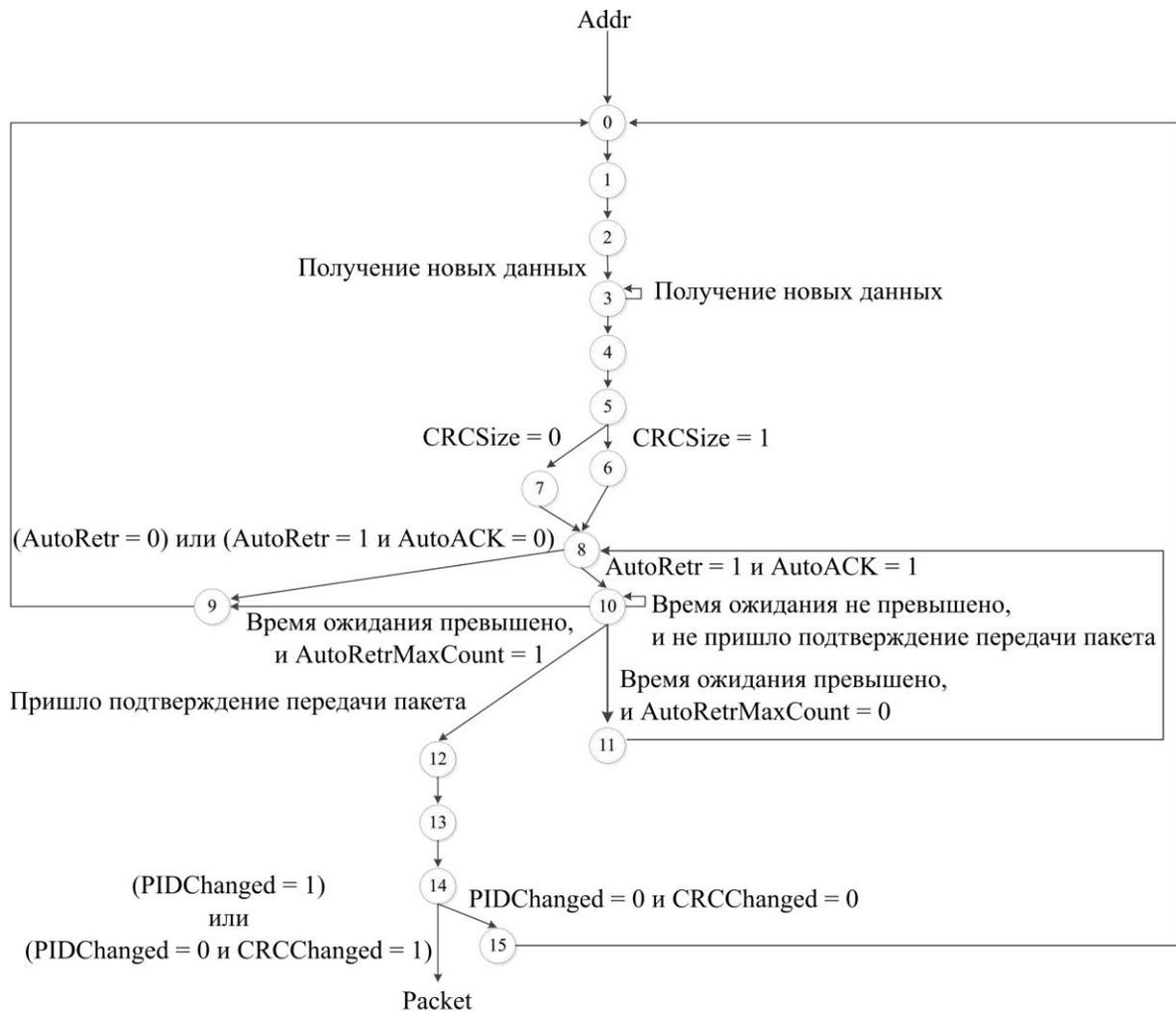


Рис. 1. Конечный автомат защищенной передачи данных
 Fig. 1. Protected data transmission finite state machine

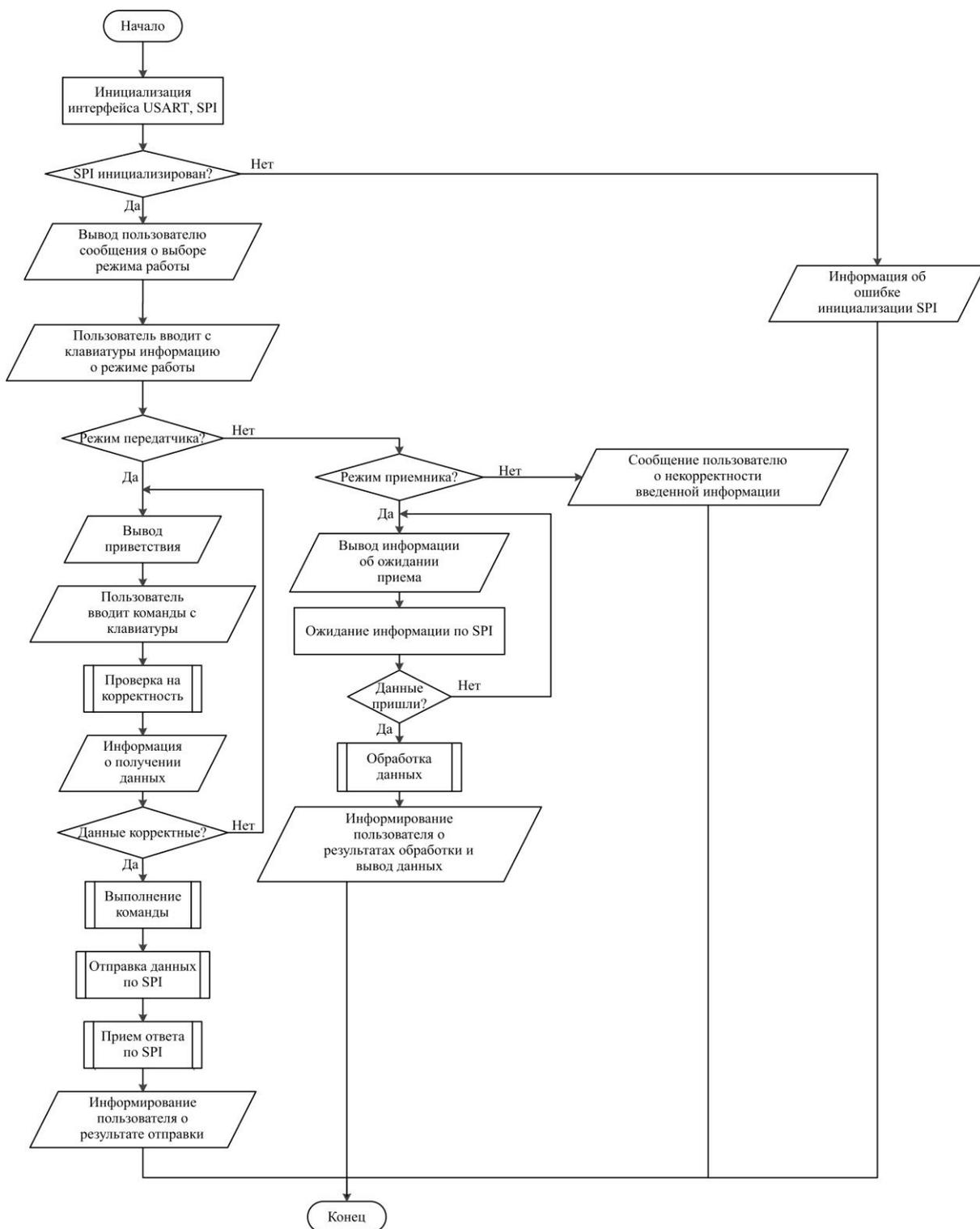


Рис. 2. Алгоритм защищенной передачи команд
 Fig. 2. Protected command transmission algorithm

В разработанном решении выполняются команды $m 0$ – переход в режим передачи данных, $m 1$ – переход в режим приема данных и s (адрес, данные) – передача сообщения, содержащего адрес, состоящий из одной, двух или трех цифр, и данные, длина которых может быть от 1 до 32 байт. Такие ограничения связаны с форматом пакета, описанным в работе [3, р. 28–30]. На основании этих данных создан конечный автомат, где понятие «слово» обозначает набор символов, следующих друг за другом до пробела. Кроме того, в разработанной модели реализована защищенная передача команд, состоящая в проверке синтаксиса команд и их соответствия описанным требованиям.

Запишем конечный автомат для защищенной передачи команд в форме [5, с. 19–22]

$$A_{\text{защ. пер. вх}} = (S_{\text{защ. пер. вх}}, X_{\text{защ. пер. вх}}, Y_{\text{защ. пер. вх}}, \delta_{\text{защ. пер. вх}}, \lambda_{\text{защ. пер. вх}}, S_{0\text{защ. пер. вх}}).$$

Здесь $X_{\text{защ. пер. вх}}$ и $Y_{\text{защ. пер. вх}}$ включают в себя буквы английского алфавита и цифры, так как являются текстовыми сообщениями. Конечное множество состояний $S_{\text{защ. пер. вх}}$ включает в себя восемь состояний. Флаг *is_transmitter* отображает режим работы устройства. В случае единицы устройство работает в режиме передатчика, а в случае нуля – в режиме приемника. Входом является введенная пользователем команда *user_command*, которая соответствует синтаксису одной из описанных команд $m 0$, $m 1$ или s (адрес, данные), выход делится на выходные данные и ошибки, возникшие в процессе обработки команды.

Основываясь на разработанной математической модели защищенной передачи данных, можно определить, что на вход будет подаваться текстовое сообщение, которое преобразуется в двоичный код. На выходе алгоритма будет получен сигнал, который характеризуется выходной мощностью, полосой пропускания, способом модуляции, амплитудой, частотой и фазой [6, с. 80–81]. На основе этих данных, а также рассмотренной модели разработан алгоритм защищенной передачи данных (рис. 2). Входными данными для модели защищенной передачи команд являются команды, которые передаются в виде текстовых сообщений и имеют описанный синтаксис, а выходными – текстовые сообщения, в которых содержится или текст, говорящий об успешности выполнения команды, или текст ошибки, возникшей во время ее выполнения. Алгоритм реализован на микроконтроллере путем программирования интерфейсов USART и SPI [7], с помощью которых передаются данные, поступающие с разъема Micro USB 2.0 [8].

На основе разработанных алгоритмов защищенной передачи данных и защищенной передачи команд разработано программное решение для работы микроконтроллера ATmega8 [7] в виде модуля управления беспроводной связью. В качестве среды разработки выбрана Microchip Studio, а программирование осуществлялось на языке C. Созданы библиотеки для реализации интерфейса USART [7] и интерфейса SPI [7], а также для реализации обработки команд, поступающих от пользователя, проверки их синтаксиса и соответствия данных в команде ограничениям протокола, описанным в документации [3, р. 28–30]. Выходными данными программы являются сообщения о результате выполнения команд или об ошибках, возникших в ходе их выполнения.

Эксперимент. Цель экспериментального исследования – измерение характеристик модуля управления беспроводной связью. Для этого проведено имитационное моделирование.

Первый эксперимент направлен на проверку синтаксиса команд, которые будут подаваться в модуль. Правильными являются команды $m 0$, $m 1$ и s . Для сравнения выбрана модуль Xbee Series 2, у которых для работы используются AT-команды, имеющие определенный синтаксис, описанный в [9]. Сначала в среде AnyLogic разработаны ими-

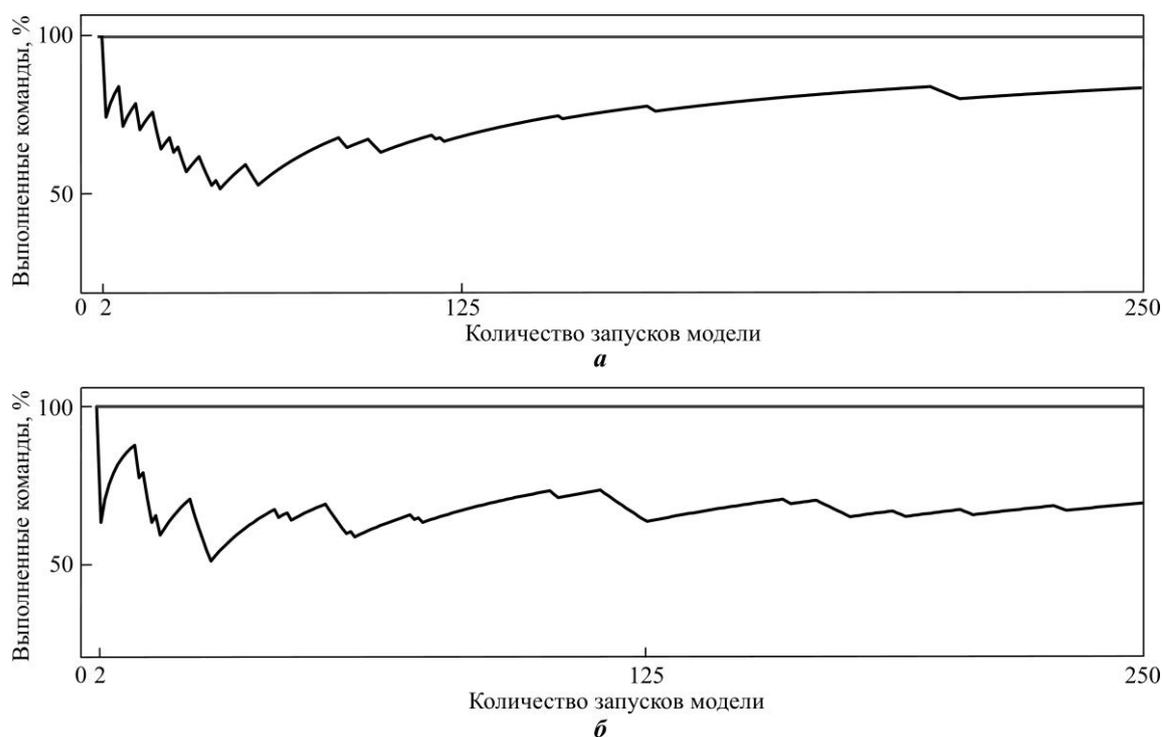


Рис. 3. Процент выполненных команд при запуске модели для модуля управления беспроводной связью (а) и модулей XBee Series 2 (б) и идеальная характеристика для них (фрагмент)
 Fig. 3. Executed commands percentage during model launch for wireless communication control module (a) and XBee series 2 modules (b) and ideal characteristic for them (fragment)

тационные модели работы модуля управления беспроводной связью и модулей XBee Series 2, представляющие собой диаграммы состояний. Проведено 1000 запусков каждой модели при подаче на вход по одной команде. В результате получены графики, фрагменты которых изображены на рис. 3. Под процентом выполненных команд по оси OY на рисунке понимается отношение количества выполненных команд к общему количеству переданных команд при увеличении общего количества переданных команд на единицу. Кроме того, на этих рисунках приведены идеальные характеристики для соответствующих модулей. Видно, что графики не являются прямыми линиями в отличие от их идеальных характеристик. Это связано с тем, что часть команд, которая подавалась на вход, не соответствует описанным синтаксисам команд для модулей.

При расчете функции согласно формуле (1) для модуля управления беспроводной связью получено значение, равное 89,25 %, что является хорошим результатом, близким к теоретическому. Для модулей XBee Series 2 значение функции равно 80,54 %, что также является хорошим результатом, так как составляет более 80 % от теоретически достижимого для данной функции. Можно заключить, что при применении разработанной программы среднее значение процента выполнения команд увеличилось на 8,71 % по сравнению с рассмотренным аналогом.

Второй эксперимент направлен на проверку возможности регулирования скорости передачи данных и дальности действия сети. Для сравнения этих характеристик выбран модуль CC2650MODA [10]. Получены следующие результаты [9, 10]: для разработанного модуля управления беспроводной связью максимальная скорость передачи данных равна 2 Мбит/с, максимальная дальность действия сети составляет 1100 м, для модуля CC2650MODA соответственно 1 Мбит/с и около 300 м.

Таким образом, у разработанного модуля максимальная скорость передачи данных в 2 раза больше, максимальная дальность действия сети примерно в 3,7 раза больше, чем у модуля CC2650MODA.

Заключение. Созданный модуль управления беспроводной связью, представляющий собой программное решение, не только обеспечивает защиту пакетов от дублирования, но и имеет улучшенные характеристики беспроводной связи, такие как скорость передачи данных и дальность действия. Однако он не позволяет полностью решить проблему с обеспечением защиты данных.

Проведенные экспериментальные исследования, выполненные с помощью имитационного моделирования, показали превосходство разработанного модуля управления беспроводной связью над аналогами.

Литература

1. *Kumar S., Tiwari P., Zymbler M.* Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review // *J. Big Data*. 2019. Vol. 6. Art. No. 111. doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
2. Internet of Things (IoT) market size, share & COVID-19 impact analysis, by component (platform, solution & services), by end-use industry (BFSI, retail, government, healthcare, manufacturing, agriculture, sustainable energy, transportation, IT & telecom, others), and regional forecast, 2021–2028 // *Fortune Business Insights* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307> (дата обращения: 13.11.2021).
3. nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz transceiver: preliminary product specification v1.0 // *Datasheet PDF* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/NRF24L01+-Datasheet-Nordic-906332> (дата обращения: 13.11.2021).
4. *Амербаев В. М., Шарамок А. В.* Обеспечение имитозащищенности и конфиденциальности в системах радиосвязи // *Методы проектирования и защиты мобильных систем связи: сб. науч. тр. / под ред. В. В. Баринаева. М.: МИЭТ, 2006. С. 70–76.*
5. *Гилл А.* Введение в теорию конечных автоматов / пер. с англ. А. Т. Дауровой и др.; под ред. П. П. Пархоменко. М.: Наука, 1966. 272 с.
6. *Айфичер Э., Джервис Б.* Цифровая обработка сигналов: практический подход / пер. с англ. И. Ю. Дорошенко, А. В. Назаренко. 2-е изд. М.: Вильямс, 2004. 989 с.
7. 8-bit Atmel with 8KBytes in-system programmable flash: ATmega8, ATmega8L // *РадиоЛоцман* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rlocman.ru/datasheet/pdf.html?di=149283> (дата обращения: 13.11.2021).
8. 105017-0001 Datasheet – Molex Electronics Ltd // *Alldatasheet.com* [Электронный ресурс]. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/387376/MOLEX11/105017-0001.html> (дата обращения: 13.11.2021).
9. XBee series 2 OEM RF modules // *Farnell* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/27606.pdf> (дата обращения: 13.11.2021).
10. CC2650MODA SimpleLink Bluetooth low energy wireless MCU module // *Texas Instruments* [Электронный ресурс]. Aug. 2016. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2650moda.pdf> (дата обращения: 13.11.2021).

Статья поступила в редакцию 23.11.2021 г.; одобрена после рецензирования 15.12.2021 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторе

Егоров Николай Иванович – аспирант Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dr.kolya-97@yandex.ru

References

1. Kumar S., Tiwari P., Zymbler M. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *J. Big Data*, 2019, vol. 6, art. no. 111. doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
2. Internet of Things (IoT) market size, share & COVID-19 impact analysis, by component (platform, solution & services), by end-use industry (BFSI, retail, government, healthcare, manufacturing, agriculture, sustainable energy, transportation, IT & telecom, others), and regional forecast, 2021–2028. *Fortune Business Insights*. Available at: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307> (accessed: 13.11.2021).
3. nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz transceiver: preliminary product specification v1.0. *Datasheet PDF*. Available at: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/NRF24L01+-Datasheet-Nordic-906332> (accessed: 13.11.2021).
4. Amerbaev V. M., Sharamok A. V. Message authentication with modification detection code and privacy conforming in radio communication systems. *Metody proyektirovaniya i zashchity mobil'nykh sistem svyazi = Methods for the Design and Protection of Mobile Communication Systems, proceedings*, ed. V. V. Barinov. Moscow, National Research University of Electronic Technology, 2006, pp. 70–76. (In Russian).
5. Gill A. *Introduction to the theory of finite-state machines*. New York, McGraw Hill, 1962. 207 p.
6. Ifeachor E. C., Jervis B. W. *Digital signal processing: a practical approach*. 2nd ed. Hoboken, NJ, Prentice Hall, 2001. 933 p.
7. 8-bit Atmel with 8KBytes in-system programmable flash: ATmega8, ATmega8L. *RadioLocman*. Available at: <https://www.rlocman.ru/datasheet/pdf.html?di=149283> (accessed: 13.11.2021).
8. 105017-0001 Datasheet – Molex Electronics Ltd. *Alldatasheet.com*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/387376/MOLEX11/105017-0001.html> (accessed: 13.11.2021).
9. XBee series 2 OEM RF modules. *Farnell*. Available at: <https://www.farnell.com/datasheets/27606.pdf> (accessed: 13.11.2021).
10. CC2650MODA SimpleLink Bluetooth low energy wireless MCU module. *Texas Instruments*. Aug. 2016. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2650moda.pdf> (accessed: 13.11.2021).

The article was submitted 23.11.2021; approved after reviewing 15.12.2021;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the author

Nikolai I. Egorov – PhD student of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dr.kolya-97@yandex.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

Алгоритм компенсации остаточной погрешности определения псевдодалности при решении навигационной задачи в абсолютном режиме

В. О. Жилинский

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

ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Москва, Россия

vladzhilinsky@mail.ru

Аннотация. Активное развитие систем спутниковой навигации способствует росту точности навигационно-временных определений. Однако текущие характеристики глобальных навигационных спутниковых систем неспособны удовлетворить всем требованиям как существующих, так и перспективных потребителей. Погрешность определения координат местоположения в абсолютном режиме по кодовым измерениям в большей степени зависит от погрешности измерения псевдодалности, которая определяется текущим рабочим созвездием навигационных космических аппаратов и алгоритмом решения навигационной задачи. Для повышения точности решения навигационной задачи необходимо учитывать те составляющие погрешности определения псевдодалности, которыми раньше пренебрегали. В работе предложен алгоритм определения координат местоположения потребителя глобальной навигационной спутниковой системы, особенностью которого является возможность компенсации остаточной погрешности определения псевдодалности при решении навигационной задачи в абсолютном режиме. Компенсация погрешности реализована в виде модели регрессии, обученной методом градиентного бустинга. Представлены результаты построения модели и оценки ее ошибки при разном числе независимых переменных признаков описания, а также результаты сравнения эффективности применения модели для двух сценариев решения навигационной задачи. Эксперименты показали, что разработанный алгоритм компенсации остаточной погрешности определения псевдодалности с помощью построенной модели позволяет повысить точность определения координат местоположения до 25 % при работе по открытым сигналам системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, навигационный алгоритм, градиентный бустинг

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-37-90016).

Для цитирования: Жилинский В. О. Алгоритм компенсации остаточной погрешности определения псевдодалности при решении навигационной задачи в абсолютном режиме // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 539–549. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-539-549>

Residual pseudorange error compensation algorithm for code-based positioning service in absolute mode

V. O. Zhilinskiy

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
Federal State Unitary Enterprise “Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering”, Moscow, Russia

vladzhilinsky@mail.ru

Abstract. The active development of global navigation satellite systems contributes to positioning, navigation and timing accuracy increase. However, present characteristics of global positioning satellite systems are not able to meet the demands of the current and potential users. The code-based positioning error in absolute mode depends mainly on the pseudorange error, which is determined by the current operating satellite constellation and the navigation algorithm. To increase the accuracy of positioning, navigation and timing service, it is necessary to take into account those components of pseudorange error, which were not previously considered. In this work, the modified navigation algorithm that can compensate the residual pseudorange error during the solution of navigation equations in absolute mode is proposed. The error compensation is implemented in the form of regression model, trained using the gradient boosting machine. The results of model development and its error estimation with different number of independent variables of feature vector, as well as the comparison of model efficiency for two scenarios of the navigation solution are presented. The experiments have shown that the developed algorithm of the residual pseudorange error compensation allows the positioning accuracy increase up to 25 % when the standard-precision GLONASS signals are used.

Keywords: GLONASS, navigation equations, gradient boosting machine

Funding: the work has been supported by Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-37-90016).

For citation: Zhilinskiy V. O. Residual pseudorange error compensation algorithm for code-based positioning service in absolute mode. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 539–549. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-539-549>

Введение. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) активно развиваются: происходит смена поколений орбитальных группировок, модифицируется наземный сегмент управления, пересматривается архитектура космического сегмента, проводятся работы по развертыванию ГНСС «Бейдоу» и «Галилео», а также модернизируется и совершенствуется навигационная аппаратура потребителей (НАП). Указанные изменения способствуют повышению эффективности работы ГНСС, включая такие характеристики, как точность, целостность, непрерывность и доступность. Однако текущие возможности ГНСС, несмотря на достижения последних лет и развитие систем навигации, неспособны удовлетворить всем требованиям потребителей [1, 2].

Повышение тактико-технических характеристик ГНСС возможно благодаря развитию наземного и космического сегментов, но это длительный и дорогостоящий процесс. Дальнейшее повышение точности навигационно-временных определений без мо-

дификации наземного и космического сегментов возможно также за счет совершенствования сегмента потребителей и обработки навигационной информации.

В настоящей работе анализируется остаточная погрешность определения псевдодальности и разрабатывается алгоритм ее компенсации при решении навигационной задачи по сигналам ГНСС ГЛОНАСС в абсолютном режиме.

Постановка задачи. Погрешность определения координат потребителя зависит от погрешности определения псевдодальности, которая определяется текущим рабочим созвездием навигационных космических аппаратов (НКА) и алгоритмом решения навигационной задачи (навигационным алгоритмом). Необходимо учитывать те составляющие погрешности, которыми раньше пренебрегали. При обработке навигационной информации возникает ряд случайных и систематических погрешностей [2–4]: погрешность эфемеридно-временного обеспечения; погрешность, вызванная влиянием ионосферы; тропосферная погрешность; погрешность, вызванная релятивистскими и гравитационными эффектами; погрешность из-за многолучевого распространения сигналов; погрешность из-за сдвига фазовых центров антенн НАП и НКА; межлитерная задержка сигнала; межканальная задержка сигнала; инструментальная погрешность в НАП и НКА. Эти погрешности влияют на измерения псевдодальности как по дальномерному коду, так и по фазе несущей частоты. При работе в абсолютном режиме, например по кодовым псевдодальностям, частью указанных погрешностей обычно пренебрегают.

Влияние ряда факторов на качество измерений псевдодальностей уникально для каждого НКА, где большую роль играют используемая аппаратура, поколение навигационных спутников и их возраст. К таким факторам можно отнести задержки в тракте НКА, погрешность эфемеридно-временного обеспечения, ионосферные и тропосферные погрешности (ввиду различия длины пути распространения сигнала и угла возвышения НКА), ошибку многолучевого распространения сигнала, комбинации используемых типов и частот сигнала, типов измерений. Также используемая приемная аппаратура, например антенна, радиотракт приемника, формируют уникальные погрешности в НАП. Часть погрешностей успешно устраняется различными методами, однако применяемые модели не всегда точны. В некоторых случаях требуется наличие дополнительной внешней информации, а уникальную погрешность, обусловленную рядом факторов, невозможно учесть при стандартном подходе к решению задачи. Для дальнейшего повышения точности навигационно-временных определений необходимо наличие средства, устраняющего указанные недостатки.

Расчет погрешности определения псевдодальности. Среди методов решения навигационной задачи наибольшее распространение получил беззапросный метод, основанный на измерении псевдодальности между НКА и НАП. Полная модель псевдодальности с учетом составляющих погрешности измерений имеет следующий вид [2]:

$$R_i = \rho_i + c(\delta t - \delta t_i) + G_i + T_i + I_i + b_i + M_i + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где $\rho_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$ – геометрическая дальность между НКА и НАП; x_i, y_i, z_i и x, y, z – координаты i -го НКА и НАП соответственно в прямоугольной геоцентрической системе координат; c – скорость света; δt_i – смещение шкалы времени НКА; δt – смещение шкалы времени НАП; G_i – погрешность из-за релятивистских и гравитационных эффектов; T_i – тропосферная погрешность; I_i – ионосферная погрешность; b_i – инструментальная погрешность НАП; M_i – задержка многолучевого распространения; ε_i – прочие составляющие погрешности.

Обозначим Tm_i поправки к шкалам времени НКА и все составляющие погрешности измерений: $Tm_i = G_i + T_i + I_i + b_i + M_i$. Тогда выражение (1) примет вид

$$R_i = \rho_i + c\delta t - c\delta t_i + Tm_i + \varepsilon_i. \quad (2)$$

Если известны опорные координаты НАП и поправка к шкале времени потребителя, можно рассчитать опорное значение псевдодальности, подставив их в (1). Обозначим индексом r компоненты в выражении (2), вычисленные с использованием априорной информации о координатах НАП и поправки к шкале времени. Тогда опорное значение псевдодальности R_i^r можно записать как

$$R_i^r = \rho_i^r + c\delta t^r - c\delta t_i + Tm_i^r + \varepsilon_i. \quad (3)$$

Остаточная погрешность псевдодальности, содержащая все неучтенные и немоделированные погрешности, определяется как разность выражений (2) и (3):

$$\Delta R = R_i^r - R_i = \Delta\rho_i + \Delta c\delta t + \Delta Tm_i = (\rho_i^r - \rho_i) + c(\delta t^r - \delta t) + (Tm_i^r - Tm_i), \quad (4)$$

где $\Delta\rho_i$, ΔTm_i и $\Delta c\delta t$ – поправки соответственно к геометрической дальности, всем составляющим погрешностям измерений, которые зависят от истинного положения НАП, и смещению шкалы НАП.

Расчет остаточной погрешности определения псевдодальности не вызывает трудностей, однако остается вопрос определения опорных значений координат НАП и поправки к шкале времени потребителя. Опорные координаты НАП могут быть вычислены высокоточными методами, например PPP (Precise Point Positioning) или дифференциальным методом. При размещении приемной аппаратуры на геодезическом пункте в качестве опорных могут применяться его координаты, что значительно упрощает задачу. Опорные значения поправки к шкале времени потребителя получить сложнее. Шкала времени потребителя, которая зависит в том числе от шкалы времени НКА, отличается от системной шкалы времени. Для определения опорных значений шкалы времени потребителя можно также воспользоваться одним из методов ГНСС-определений при размещении на пункте с известными координатами. Шкала времени

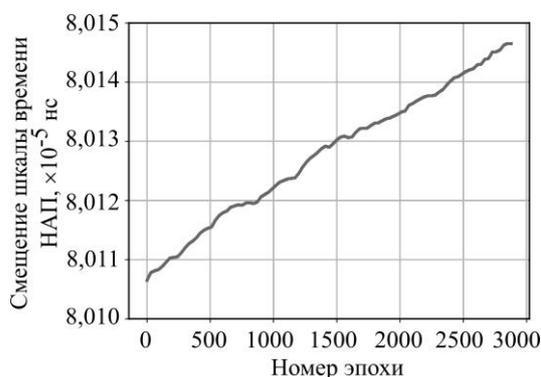


Рис. 1. Поправка шкалы времени потребителя к системной шкале времени на суточном интервале

Fig. 1. Receiver clock offset for a one-day interval

навигационных аппаратов отличается от системной шкалы времени, но при условии применения высокостабильных эталонов частоты и времени в качестве источников сигналов 10 МГц и 1 Гц, подключенных на вход приемника, соответствующая поправка к псевдодальности для учета смещения шкалы времени потребителя может быть аппроксимирована полиномиальной моделью [5].

На рис. 1 приведен график поправки шкалы времени потребителя к системной шкале времени на суточном интервале для НАП, участвующей в эксперименте. Погрешность аппроксимации данной кривой полиномиальной моделью достаточно мала.

Построение модели регрессии. Рассчитанные в соответствии с (4) невязки псевдодальностей могут быть использованы для корректировки измерений псевдодальности. Рассматривая задачу оценки остаточной погрешности псевдодальности как задачу восстановления регрессии, можно для каждой эпохи (момента времени проведения измерений) определить эту погрешность по некоторому множеству признаков уже без опорных координат НАП и поправки к шкале времени.

Существующие методы машинного обучения показали свою эффективность при решении задач регрессии и классификации в разных предметных областях. К наиболее часто применяемым в задачах регрессии методам можно отнести метод опорных векторов, нейронные сети, «деревья» принятия решений и случайный «лес» (Random Forest) [6–9]. Также часто используются методы построения ансамблей моделей [10] – стекинг (stacking), бэггинг (bagging) и бустинг (boosting).

Наилучшие результаты достигаются при применении современных методов машинного обучения, например градиентного бустинга, который может сохранять баланс между малым смещением оценки и дисперсией, хотя в большей степени имеет склонность к переобучению по сравнению с другими методами. Обучение модели методом градиентного бустинга проводится итеративно, при этом каждая следующая итерация учитывает ошибки обучения предыдущей модели в соответствии с указанным функционалом качества. Согласно принципу минимизации эмпирического риска на тренировочном наборе данных минимизируется среднее функции потерь:

$$\hat{F} = \arg \min_{x,y} E_{x,y} [L(y, F(x))]. \quad (6)$$

Итоговая модель обычно представляется в виде композиции базовых алгоритмов h_m из некоторого ограниченного множества:

$$\hat{F}(x) = \sum_{m=1}^M h_m(x). \quad (7)$$

Построение модели происходит итеративно в соответствии со следующим выражением:

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + h_m(x),$$

где новый базовый алгоритм h_m определяется таким образом, чтобы доставить минимум функции потерь для F_{m-1} :

$$h_m(x) = \arg \min \left(\sum_{i=1}^n L(y_i, F_{m-1}(x_i) + h(x_i)) \right).$$

Обученная модель может быть далее внедрена в производство. При решении навигационной задачи в НАП модели на вход подается вектор признаков, на выходе имеется оценка остаточной погрешности псевдодальности, которая может быть учтена в уравнении псевдодальности. Таким образом, скорректированная оценка псевдодальности может быть записана с учетом оценочного значения остаточной погрешности псевдодальности в следующем виде:

$$R_i^c = \rho_i + c(\delta t - \delta t_i) + Tm_i + \Delta \hat{R} + \varepsilon_i.$$

Для построения модели регрессии используется тренировочный набор данных – выборка пар (\mathbf{X}, y) независимых переменных \mathbf{X} и зависимой переменной y , представляющей собой вычисленную в соответствии с (4) остаточную погрешность псевдодальности. Изначально для формирования признакового описания количество доступных

для обработки параметров, содержащихся в файлах формата RINEX [11], ограничено. Модель, обученная на тренировочном наборе данных с малым количеством признаков (4)–(7), показала неудовлетворительный результат. Поэтому были отобраны и сформированы на основе доступных параметров дополнительные признаки. Итоговое признаковое описание модели содержит следующие параметры: snr_{L1}, snr_{L2} – коэффициенты сигнал/шум для двух диапазонов частот радиосигнала $L1, L2$; el – угол возвышения НКА; s – невязки псевдодальностей, рассчитанные без использования априорных данных; $\|s\|$ – норма вектора невязок; GDOP – геометрический фактор снижения точности; $snr_{L1-L2} = snr_{L1} - snr_{L2}$ – разность коэффициентов сигнал/шум для двух диапазонов частот; d_{L1}, d_{L2} – разность радиальных скоростей сближения потребителя и НКА, вычисленных через производную псевдодальности по времени и измерение доплеровского смещения несущей частоты радиосигнала, для двух диапазонов частот радиосигнала $L1, L2$; $d_{L1-L2} = d_{L1} - d_{L2}$ – разность предыдущего параметра, вычисленного для двух диапазонов частот.

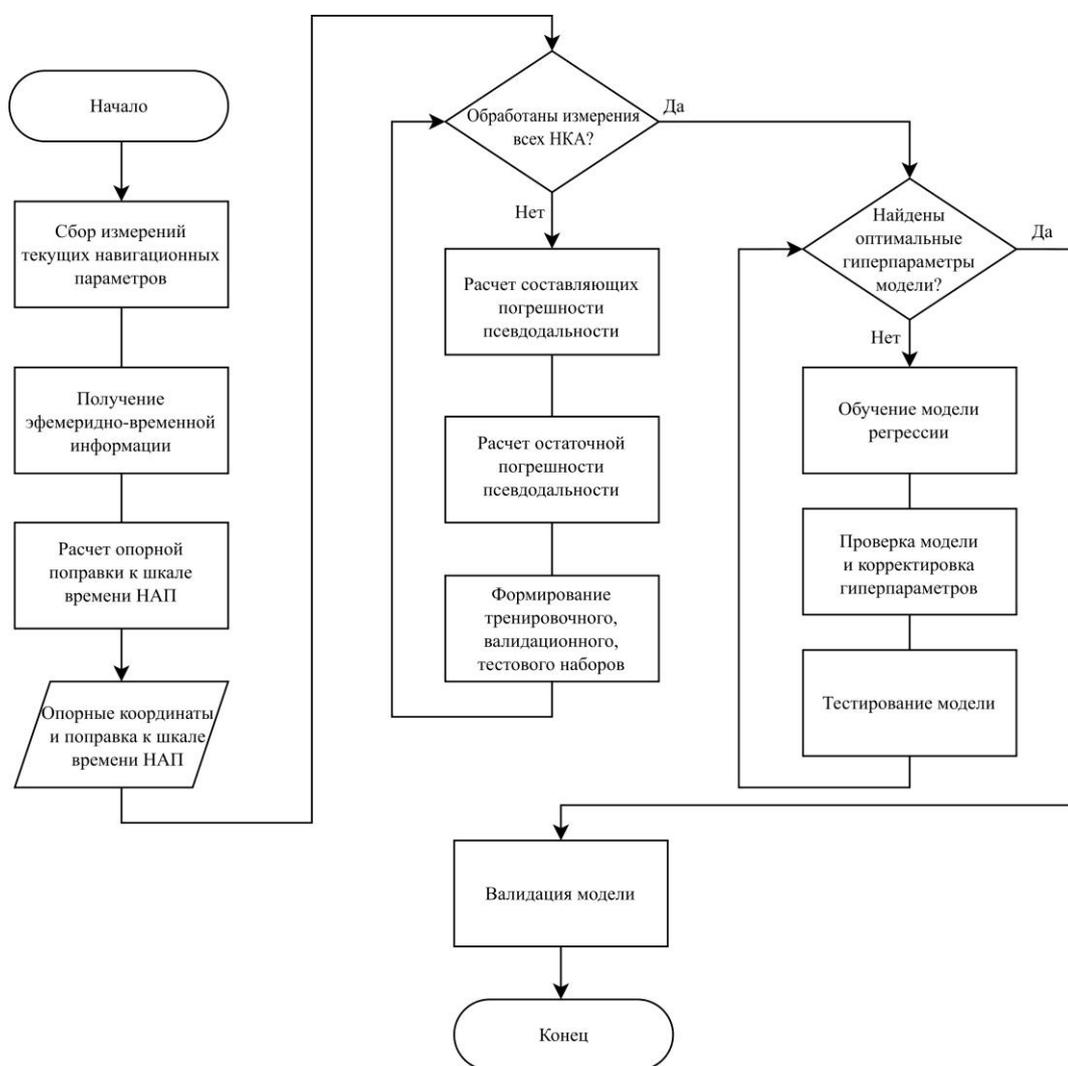


Рис. 2. Схема алгоритма расчета остаточной погрешности определения псевдодальности и построения модели регрессии

Fig. 2. Diagram for residual pseudorange error calculation and model learning algorithm

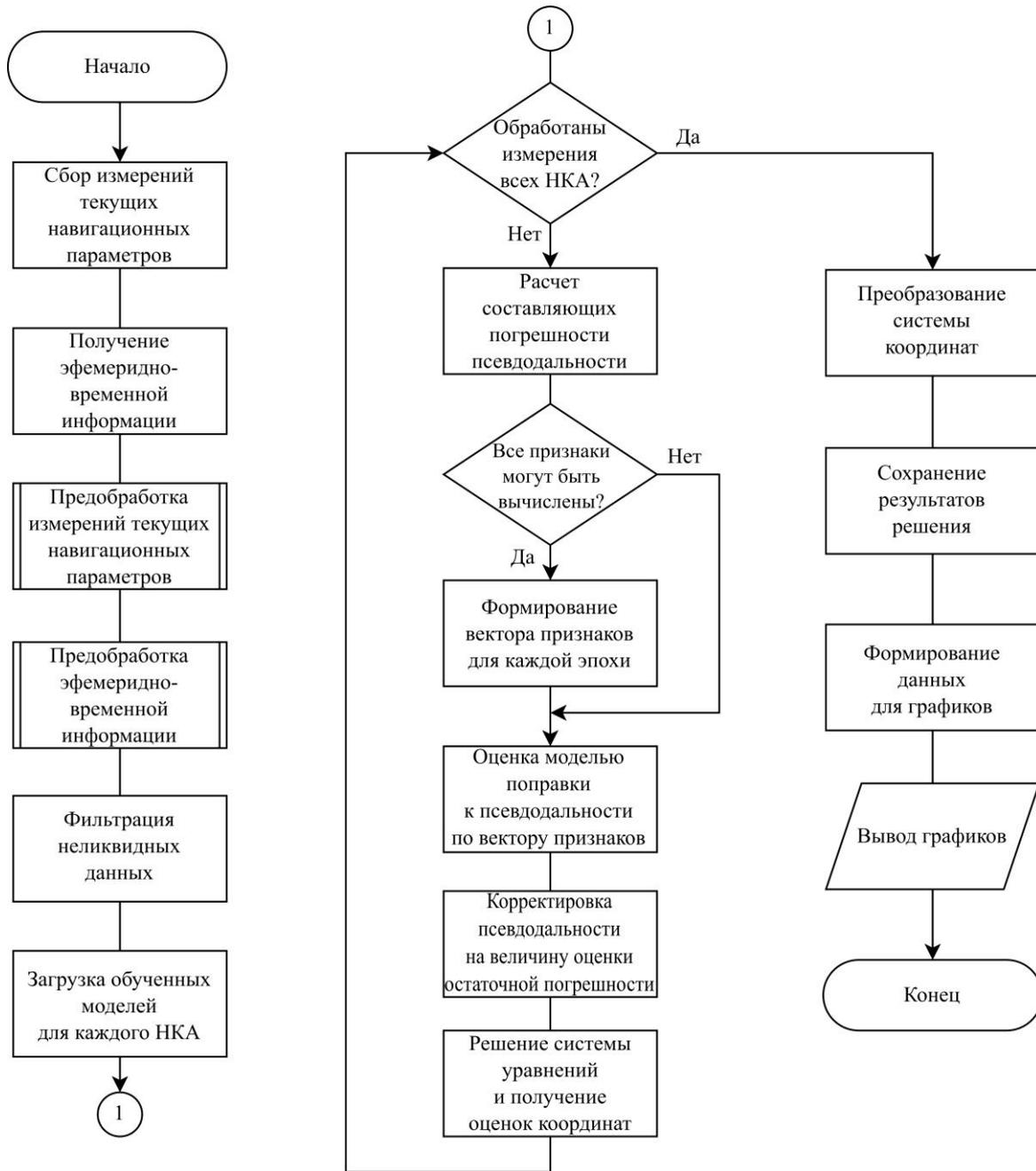


Рис. 3. Схема алгоритма решения навигационной задачи с компенсацией остаточной погрешности определения псевдодальности

Fig. 3. Diagram for navigation algorithm with predicted residual pseudorange error compensation

Векторы независимых переменных и целевой переменной для обучающей, тестовой и валидационной выборок имеют следующий вид:

$$X = [snr_{L1}, snr_{L2}, el, s, \|s\|, GDOP, snr_{L1-L2}, d_{L1}, d_{L2}, d_{L1-L2}],$$

$$y = \Delta R.$$

Работа с моделью машинного обучения состоит из двух основных этапов: построение модели и применение модели. Построение модели включает в себя сбор, предварительную обработку данных, расчет целевой переменной, формирование вектора при-

знаков, обучение, тестирование и валидацию модели. Алгоритм расчета остаточной погрешности определения псевдодальности и построения модели регрессии представлен на рис. 2. Схема алгоритма решения навигационной задачи с компенсацией остаточной погрешности определения псевдодальности оценочным значением остаточной погрешности, рассчитываемой регрессионной моделью, представлена на рис. 3.

В процессе построения модели при ее тестировании и валидации в качестве метрики использовалась среднеквадратическая ошибка (RMSE). Поскольку характер остаточной погрешности уникален для каждого НКА, целесообразно строить модели регрессии для каждого НКА в отдельности. Рассчитанные метрики качества обучения модели на валидационной выборке при 5, 7 и 10 признаках приведены в таблице.

Качество обучения моделей при разном количестве признаков
Model learning metrics for different number of features

НКА	Номер литеры	RMSE, м		
		$ X = 5$	$ X = 7$	$ X = 10$
R01	1	1,20	1,19	1,07
R02	-4	1,00	0,99	0,93
R03	5	1,18	1,18	1,07
R04	6	1,23	1,22	1,09
R05	1	1,11	1,10	1,00
R07	5	1,16	1,17	1,08
R08	6	1,24	1,23	1,10
R09	-2	1,06	1,07	0,96
R11	0	1,13	1,11	1,04
R12	-1	1,11	1,10	1,00
R13	-2	1,52	1,50	1,35
R14	-7	1,14	1,14	1,05
R15	0	1,13	1,12	1,03
R16	-1	1,29	1,26	1,15
R17	4	1,07	1,06	0,96
R18	-3	1,08	1,07	0,99
R19	3	1,55	1,48	1,32
R20	2	1,45	1,43	1,27
R21	4	1,29	1,29	1,15
R22	-3	1,65	1,66	1,45
R24	2	1,17	1,17	1,04

Из таблицы видно, что наихудшие метрики достигаются для НКА R13, R19, R20, R22. Среднеквадратическое отклонение (СКО) рассчитанной остаточной погрешности определения псевдодальности для указанных навигационных аппаратов также гораздо больше по сравнению с СКО для остальных НКА. Также видно, что добавление дополнительных параметров в признаковое описание способствует снижению метрики качества модели в среднем на 10 %. Построенные модели регрессии использованы при решении навигационной задачи для оценки способности разработанного алгоритма компенсировать оценочное значение остаточной погрешности и влияния на точность навигационно-временных определений.

Результаты эксперимента. Сбор измерений текущих навигационных параметров, расчет остаточной погрешности определения псевдодальностей и оценок погрешностей координат местоположения потребителя проводились при следующих условиях:

- использовали высокоточную апостериорную эфемеридно-временную информацию, предоставленную информационно-аналитическим центром контроля ГЛОНАСС и GPS;
- измерения псевдодальностей проводили в диапазоне $L1$ и $L2$;
- дискретность измерений равна 30 с;
- интервал измерений – 3 недели;
- маска угла возвышения НКА более 5° ;
- учитывали смещение шкалы времени НКА;
- учитывали смещение НКА за время распространения сигнала;
- учитывали релятивистские и гравитационные эффекты;
- рассчитывали ионосферную поправку (с использованием ионосферно-свободной комбинации);
- рассчитывали тропосферную поправку (модель MOPS);
- проводили измерения текущих навигационных параметров с НАП septentrio, размещенной на геодезическом пункте на территории ВНИИФТРИ (р. п. Менделеево, Московская обл.).

Для построения модели регрессии использовали данные за 21 день: из первых 14 суток сформирована тренировочная выборка, следующие 7 суток отведены для тестовой выборки, последние 7 суток – для валидационной. Результаты решения навигационной задачи получены при равных условиях для двух сценариев: стандартное решение навигационной задачи; решение навигационной задачи с компенсацией прогнозного значения погрешности псевдодальности при использовании 5, 7, 10 признаков.

На рис. 4 приведены графики погрешности определения координат в плане для двух указанных сценариев за первый день из валидационной выборки. На рис. 4, *а* представлено стандартное решение навигационной задачи, на рис. 4, *б* – решение с компенсацией остаточной погрешности определения псевдодальности при 10 признаках.

Применение алгоритма компенсации остаточной погрешности псевдодальности позволило снизить СКО погрешности определения координат в плане, рассчитанные значения которого в плане для всех сценариев решения навигационной задачи следующие:

<i>Тип сценария</i>	<i>СКО, м</i>
Стандартное решение	2,42
С учетом остаточной погрешности при $ X = 5$	2,01
при $ X = 7$	1,98
при $ X = 10$	1,75

Величина СКО оценки координат имеет небольшое различие при использовании 5 и 7 признаков, но значительно уменьшается при формировании вектора признаков из 10 параметров.

СКО погрешности определения координат в плане также рассчитано для оставшихся 6 дней валидационной выборки для стандартного и предложенного решений при $|X| = 10$. В среднем на всем интервале наблюдений применение модели для компенсации остаточной погрешности позволяет снизить СКО определения координат в плане на 23 %.

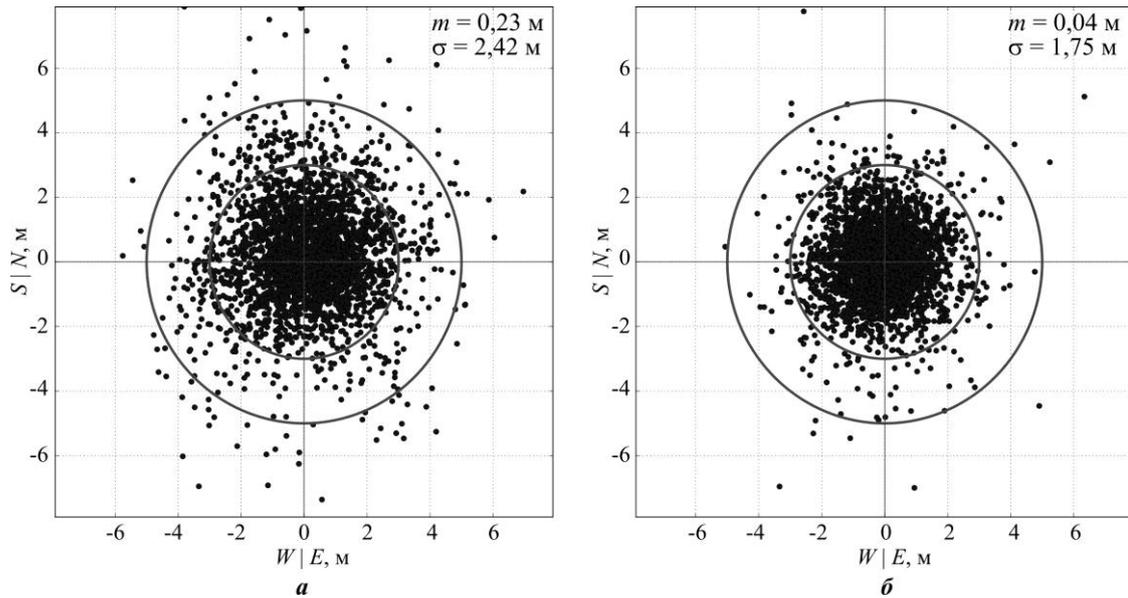


Рис. 4. Погрешность определения координат в плане при решении навигационной задачи стандартным алгоритмом (а) и предложенным алгоритмом (б)

Fig. 4. Horizontal coordinates error obtained with the use of standard code-based positioning algorithm (a) and developed code-based positioning algorithm (b)

Закключение. Применение разработанного алгоритма компенсации остаточной погрешности определения псевдодалности и построения модели машинного обучения методом градиентного бустинга позволяет повысить точность определения координат потребителя в среднем на 25 % по сравнению со стандартным решением навигационной задачи в абсолютном режиме.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. *Joubert N., Reid T. G. R., Noble F.* Developments in modern GNSS and its impact on autonomous vehicle architectures // 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Las Vegas, NV: IEEE, 2020. P. 2029–2036. doi: <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304840>
3. *Антонович К. М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. Т. 1. М.: Картогеоцентр, 2005. 333 с.
4. *Yamada H., Takasu T., Kubo N., Yasuda A.* Evaluation and calibration of receiver inter-channel biases for RTK-GPS/GLONASS // Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010). Portland, OR: ION, 2010. P. 1580–1587.
5. *Kaplan E. D., Hegarty C. J.* Understanding GPS/GNSS: principles and applications. 3rd ed. Boston; London: Artech House, 2017. 1064 p.
6. *Evgeniou T., Pontil M.* Support vector machines: theory and applications // Machine Learning and Its Applications / eds G. Paliouras, V. Karkaletsis, C. D. Spyropoulos. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. P. 249–257. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-44673-7_12
7. Decision tree // Encyclopedia of Database Systems / eds L. Liu, M. T. Özsu. Boston, MA: Springer, 2009. P. 765. doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_2445
8. *Breiman L.* Random forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5–32. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
9. *Lathuilière S., Mesejo P., Alameda-Pineda X., Horaud R.* A comprehensive analysis of deep regression // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2020. Vol. 42. No. 9. P. 2065–2081. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2910523>
10. *Dieterich T. G.* Ensemble methods in machine learning // Multiple Classifier Systems, MCS 2000. Berlin; Heidelberg: Springer, 2000. P. 1–15. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1

11. RINEX: The receiver independent exchange format // International GNSS Service [Электронный ресурс]. URL: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf> (дата обращения: 15.08.2022).

Статья поступила в редакцию 21.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 16.05.2022г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторе

Жилинский Владислав Олегович – аспирант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), научный сотрудник отдела метрологического обеспечения навигационных и радиотехнических измерительных средств ГЛОНАСС Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия, 141570, Московская область, г. Солнечногорск, р. п. Менделеево, пром-зона ФГУП ВНИИФТРИ, корп. 11), vladzhilinsky@mail.ru

References

1. Perov A. I., Kharisov V. N. (eds.). *GLONASS. Design concept and principles of operation*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (In Russian).
2. Joubert N., Reid T. G. R., Noble F. Developments in modern GNSS and its impact on autonomous vehicle architectures. *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Las Vegas, NV, IEEE, 2020, pp. 2029–2036. doi: <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304840>
3. Antonovich K. M. *The use of satellite radio navigation systems in geodesy*, in 2 vol. Vol. 1. Moscow, Kartgeotsentr Publ., 2005. 333 p. (In Russian).
4. Yamanda H., Takasu T., Kubo N., Yasuda A. Evaluation and calibration of receiver inter-channel biases for RTK-GPS/GLONASS. *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*. Portland, OR, ION, 2010, pp. 1580–1587.
5. Kaplan E. D., Hegarty C. J. *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. 3rd ed. Boston, London, Artech House, 2017. 1064 p.
6. Evgeniou T., Pontil M. Support vector machines: theory and applications. *Machine Learning and Its Applications*, eds G. Paliouras, V. Karkaletsis, C. D. Spyropoulos. Berlin, Heidelberg, Springer, 2001, pp. 249–257. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-44673-7_12
7. Decision tree. *Encyclopedia of Database Systems*, eds.: L. Liu, M. T. Özsu. Boston, MA, Springer, 2009, p. 765. doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_2445
8. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, pp. 5–32. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
9. Lathuilière S., Mesejo P., Alameda-Pineda X., Horaud R. A comprehensive analysis of deep regression. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, no. 9, pp. 2065–2081. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2910523>
10. Dietterich T. G. Ensemble methods in machine learning. *Multiple Classifier Systems, MCS 2000*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2000, pp. 1–15. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1
11. RINEX: The receiver independent exchange format. *International GNSS Service*. Available at: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf> (accessed: 15.08.2022).

The article was submitted 21.04.2022; approved after reviewing 16.05.2022; accepted for publication 07.07.2022.

Information about the author

Vladislav O. Zhilinskiy – PhD student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Scientific Researcher of the Metrological Support of Navigation and Radio Engineering Measuring Instruments GLONASS Department, Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (Russia, 141570, Moscow region, Solnechnogorsk, Mendeleevo, Industrial zone of FSUE “VNIIFTRI”, bld. 11), vladzhilinsky@mail.ru

Кластеризация концентратора данных в составе измерительного поста АСМОС

А. С. Рябышенков, Е. А. Волкова

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

eavolkova2015@mail.ru

Аннотация. Разработка систем мониторинга выбросов загрязняющих веществ в атмосферную среду в настоящее время является актуальной задачей. Подобные системы включают в себя набор устройств, проводящих непрерывные измерения экологических параметров с помощью подключаемых сенсоров. Как правило, такие устройства основаны на микроконтроллерных системах с пониженным энергопотреблением, но имеют ограничения на количество подключаемых сенсоров ввиду малой вычислительной мощности микроконтроллеров, а также портов ввода-вывода последних. В работе описаны принципы кластеризации устройства концентратора данных в составе измерительного поста автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС). Разработана функциональная схема и алгоритм работы концентратора данных с учетом внесенных изменений. Проведен расчет времени автономной работы устройства для двух режимов работы. Установлено, что расчетные значения кластерного режима работы превышают классический режим на 36 %.

Ключевые слова: автоматизированная система мониторинга окружающей среды, АСМОС, экология, измерительный пост

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке центра НТИ «Сенсорика» в НОЦ «Распределенные цифровые сенсорные системы» НИУ МИЭТ (рег. № НИОКТР АААА-А20-1200130090100-3).

Для цитирования: Рябышенков А. С., Волкова Е. А. Кластеризация концентратора данных в составе измерительного поста АСМОС // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 550–558. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-550-558>

Original article

Clustering of the data concentrator as part of the ASMOS measuring post

A. S. Riabyshenkov, E. A. Volkova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

eavolkova2015@mail.ru

Abstract. The relevance of automated environmental monitoring is confirmed annually by the growth of emissions into the atmosphere. Thus, there is an increasing demand for the development of monitoring systems, represented by a set of devices that continuously measure environmental parameters using plug-in sensors. As a rule, these devices are based on microcontroller systems with low power consumption, but have severe limitations on the number of connected sensors due to the low computing power of microcontrollers, as well as the number of I/O ports of the latter. In this work, the principles of clustering a data concentrator device, part of a measuring post of an automated environmental monitoring system, are described. A functional diagram and an algorithm for the operation of a data concentrator have been developed, considering the changes made. The calculation of the battery life of the device for two modes of operation was carried out. It has been established that the calculated values of the cluster operation mode exceed the classical one by up to 36 %.

Keywords: automated environmental monitoring systems, environment, ecology, measuring post

Funding: the work has been supported by NTI “Sensorika” center in the Research Center “Distributed Digital Sensor Systems” of MIET (R&D reg. No. AAAAAA-A20-1200130090100-3).

For citation: Riabyshenkov A. S., Volkova E. A. Clustering of the data concentrator as part of the ASMOS measuring post. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 550–558. doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-550-558

Введение. Техногенная деятельность человечества ощутимо воздействует на окружающую среду. Это вызывает необходимость организации широкомасштабной и эффективной автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС), особенно в крупных городах и вокруг экологически опасных объектов [1]. Для решения указанной проблемы используются комплексы технических и программных средств, основной целью которых является контроль состояния окружающей среды на отдельных территориях. Такие комплексы можно условно разделить на несколько уровней: на нижнем уровне находятся сенсорные устройства и датчики, а также приемопередающее оборудование, верхний уровень состоит из вычислительного оборудования (центрального сервера системы) и устройства приемника (центрального пункта сбора и обработки данных). Устройства, собирающие показания с датчиков системы, работают по предварительно заданному алгоритму и ограничены в количестве подключаемых датчиков ввиду недостаточного количества используемых микроконтроллерных модулей.

В настоящей работе для решения проблемы автоматизированного мониторинга окружающей среды предлагается структура концентратора данных в составе измерительного поста АСМОС с поддержкой функций кластеризации.

Постановка задачи. Предлагаемое решение кластеризации концентратора данных в составе измерительного поста АСМОС основано на изменении конструкции и программно-алгоритмической составляющей ранее разработанного концентратора данных. Структура аппаратной части концентратора данных представлена на рис. 1.

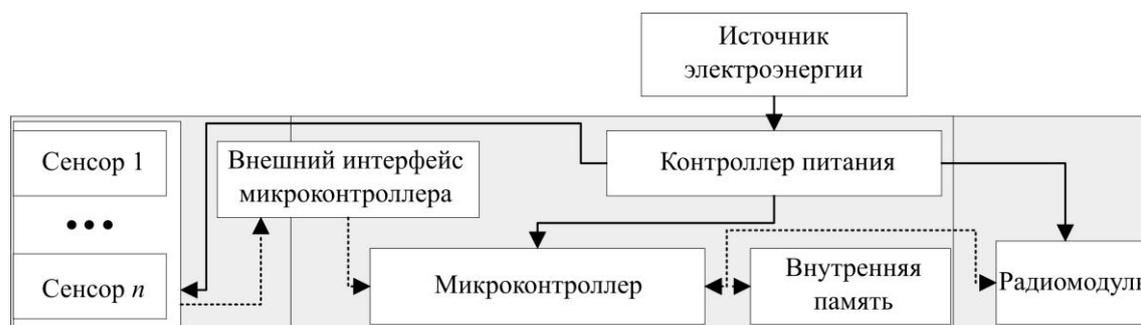


Рис. 1. Структура аппаратной части измерительного поста: — электропитание; данные
 Fig. 1. Hardware structure of the measuring station: — power supply; data

Основными компонентами аппаратной части являются вычислительный модуль, представленный микроконтроллером (МК) AVR ATmega328p, модуль подключаемых сенсоров или датчиков, модуль беспроводного приемопередающего устройства. В качестве последнего используется модуль SX1276, относящийся к линейке передатчиков сетей LPWAN, что подтверждает его энергоэффективность и повышенный радиус действия [2–4].

Для обеспечения возможности кластеризации концентратора данных требуется внести изменения в его аппаратную часть: добавить интерфейс подключения дополнительных вычислительных модулей и модулей сенсорных устройств. Ввиду наличия встроенных промышленных интерфейсов в микроконтроллере обеспечить передачу данных между двумя и более вычислительными модулями возможно с использованием интерфейсов UART, SPI, I²C.

Кластеризация концентратора данных с использованием интерфейсов. При использовании последовательного интерфейса передачи данных UART можно обеспечить соединения на скорости до 115,2 Кбит/с. Однако из-за наличия у микроконтроллера одного интерфейса UART необходимо использовать его стороннюю реализацию с применением свободных цифровых портов ввода-вывода. Это вводит дополнительные ограничения на количество подключаемых сенсоров, а также на возможность использования приемопередающих модулей с последовательным соединением [5].

Интерфейс SPI позволяет подключать вычислительные модули между собой в режиме ведущий – ведомый. При добавлении одного устройства в сеть требуется использование одного свободного порта ввода-вывода. Интерфейс SPI дает возможность устанавливать соединение на скорости до 20 Мбит/с, что значительно превышает аналогичное значение интерфейса UART [6].

Интерфейс I²C является модификацией последовательных протоколов передачи данных с использованием уникальной в рамках одной системы адресации. Данное обстоятельство позволяет передавать данные на скорости до 100 Кбит/с в классическом исполнении и до 400 Кбит/с в быстром режиме [7].

Таким образом, наиболее применимым интерфейсом для взаимодействия компонентов кластера концентратора данных является SPI. Данный интерфейс может быть использован для подключения опциональных модулей, например для постоянного запоминающего устройства, выполненного на основе флеш-памяти, а также задействован в концентраторе данных для подключения беспроводного приемопередающего модуля, что позволяет минимизировать изменение программной составляющей измерительного поста в целом.

На рис. 2 представлена функциональная схема основного модуля концентратора данных в составе измерительного поста с учетом внесения описанных изменений.

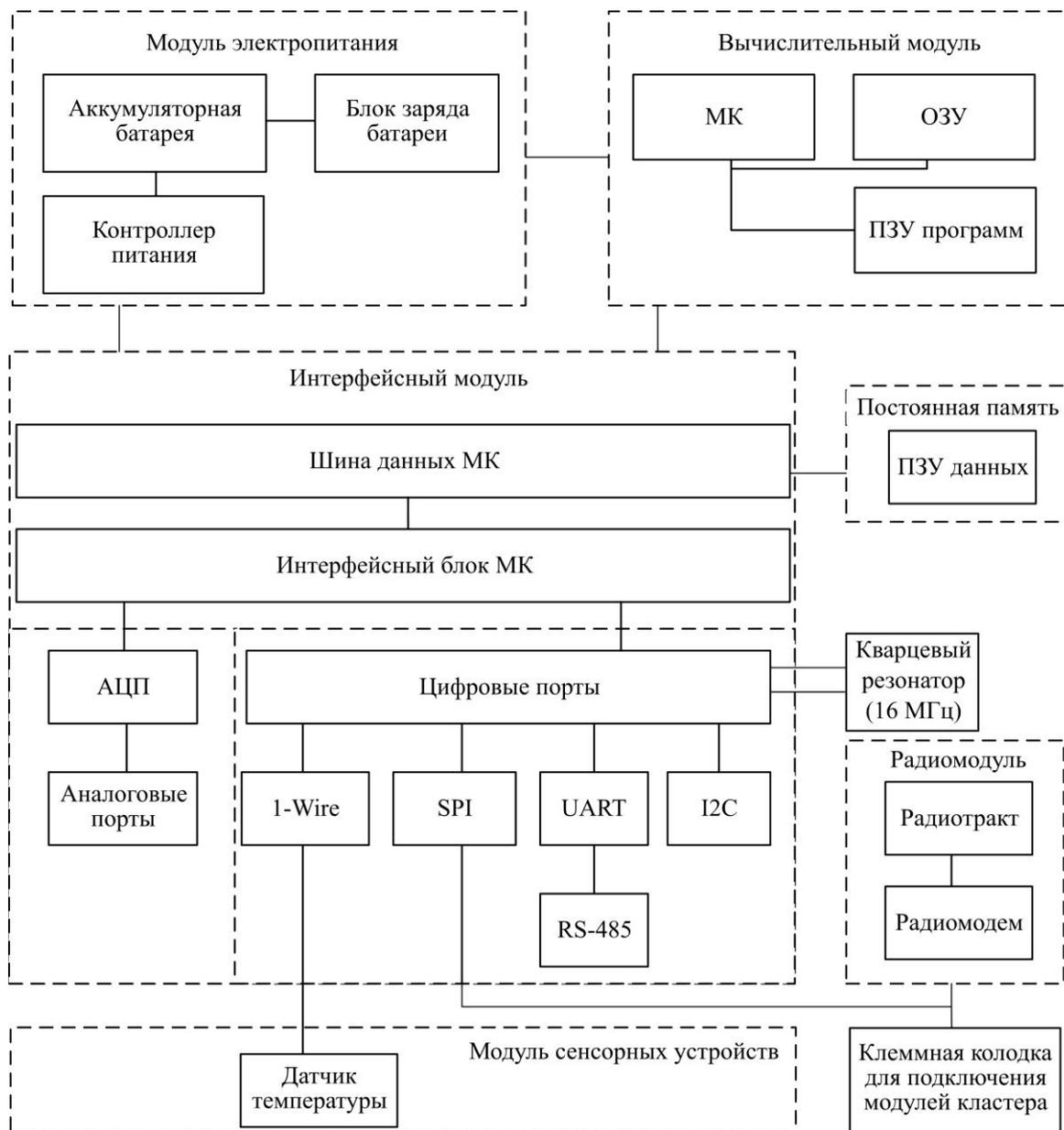


Рис. 2. Функциональная схема основного модуля концентратора данных измерительного поста (ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь)

Fig. 2. Functional diagram of the main module of the data concentrator of the measuring station (ОЗУ – random access memory; ПЗУ – permanent storage device; АЦП – analog-to-digital converter)

На рис. 3 показан упрощенный вид функциональной схемы подключаемых модулей измерительного поста. Ввиду наличия основного модуля концентратора данных не требуются приемопередающий модуль и модуль электропитания.

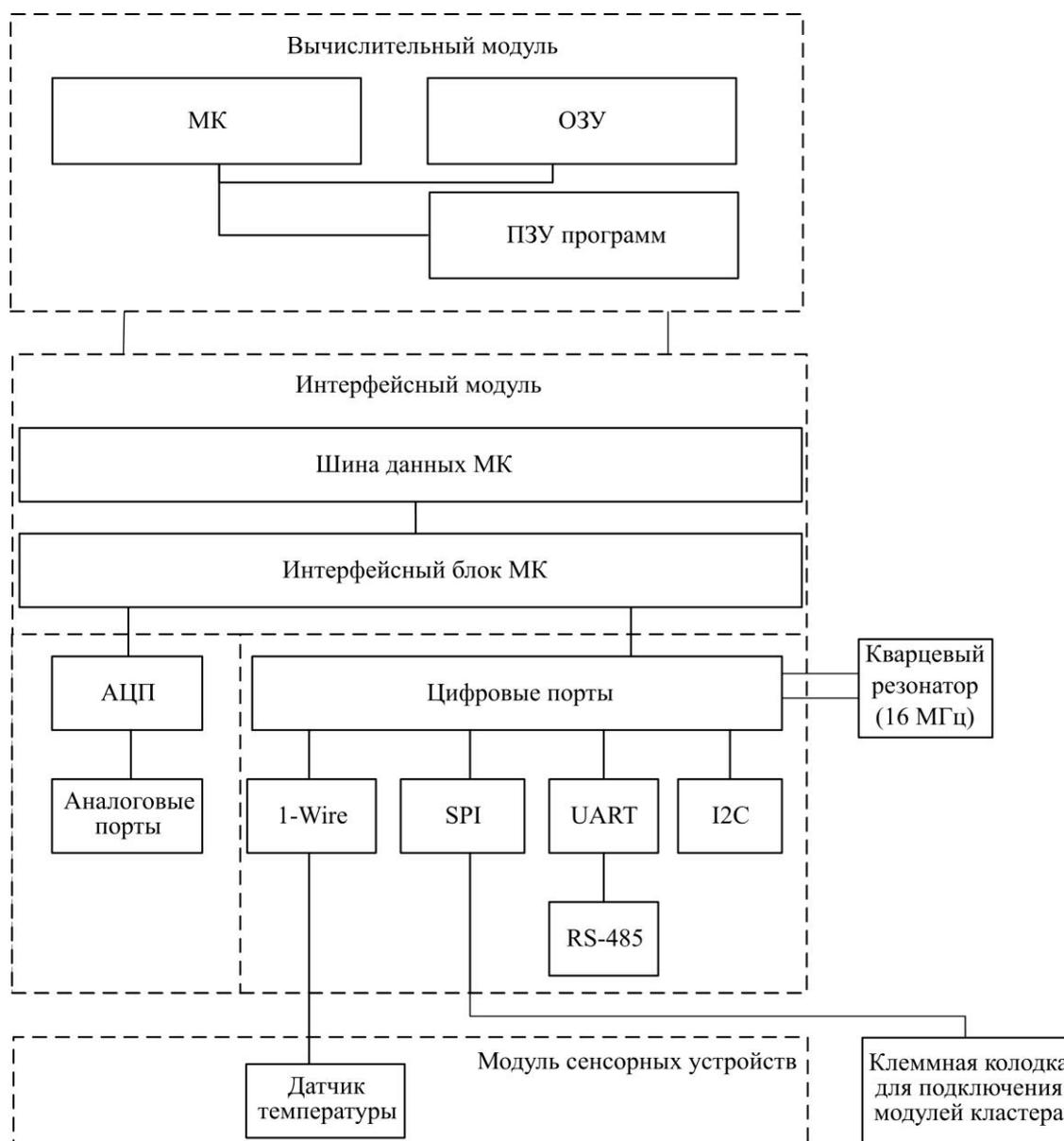


Рис. 3. Функциональная схема подключаемого модуля концентратора данных измерительного поста в кластерном режиме работы

Fig. 3. Functional diagram of the plug-in module of the data concentrator of the measuring post in the cluster mode of operation

Алгоритм работы измерительного поста. Программная платформа устройства представлена совокупностью алгоритмических решений, функционал которых полностью покрывает требования к сбору, хранению и передаче данных с сенсорных устройств или датчиков. Кроме того, программная часть системы обеспечивает работу алгоритмов управления электропитанием сенсорных устройств, динамической конфигурации периода опроса сенсорных устройств на основе полученных данных, а также формирование информационного пакета для передачи через радиоканал.

Алгоритм работы устройства выражен циклическим выполнением последовательности функций:

- инициализация и начальное конфигурирование модулей измерительного поста (один раз при каждом включении устройства);
- адаптивное конфигурирование периода опроса данных на основе предыдущих значений параметров сенсорных устройств (при их наличии);
- сбор данных с выбранных сенсорных устройств, формирование информационного сообщения с использованием уникального идентификатора измерительного поста и данных;
- отправка информационного сообщения;
- выключение питания сенсорных устройств.

Аналогично аппаратной составляющей в алгоритм работы измерительного поста требуется внести изменения, а именно добавить функционал опроса кластерных модулей концентраторов данных (КД). При этом для основного и подключаемых вычислительных модулей необходимо разработать различные алгоритмы работы. На рис. 4 представлен алгоритм работы основного модуля, на рис. 5 – подключаемого модуля. Основное отличие заключается в блоке опроса кластерных модулей и блоке формирования сетевого пакета. Для блока опроса кластерных данных требуется добавление функционала инициализации сбора данных с подключаемых модулей и их последующее хранение в памяти оперативного запоминающего устройства основного модуля. Такой подход позволяет включать данные с ведомых модулей в итоговый сетевой пакет. Таким образом, в блок формирования сетевого пакета необходимо внести изменения, описывающие возможность передачи этих данных.

Отметим, что основной потребитель электроэнергии во всем цикле работы измерительного поста – приемопередающий модуль. Поэтому требуется добавить возможность смены режима работы как основного модуля, так и подключаемых, т. е. обеспечить работу в базовом и адаптивном режимах работы. В базовом режиме модуль концентратора данных ведет опрос сенсоров при неизменном периоде опроса, значение которого берется из текста исполняемой программы на этапе начальной настройки.



Рис. 4. Алгоритм работы основного модуля концентратора данных АСМОС в кластерном режиме

Fig. 4. Algorithm of operation of the main module of the ASMOS data concentrator in cluster mode



Рис. 5. Алгоритм работы подключаемого модуля концентратора данных измерительного поста АСМОС

Fig. 5. Algorithm of operation of the plug-in module of the data concentrator of the automated environmental monitoring system measuring station

В адаптивном режиме период опроса может быть изменен для каждого отдельного сенсора концентратора данных. Изменение значения периода опроса основано на сравнении текущего и хранимого значений опрошенных сенсоров. При незначительном изменении, не превышающем конфигурируемого порога, данные не включаются в сетевой пакет на основном модуле или не передаются через шину SPI для подключаемого модуля. Таким образом, применение адаптивного алгоритма может существенно снизить расходы на передачу незначительно изменяемых параметров.

Отметим, что использование адаптивного режима работы приемлемо для измерений ряда параметров в городской среде, например значения концентрации CO_2 в воздухе, концентрации примесей. Такой подход обусловлен необходимостью получения точных данных в часы высокой нагрузки на дорожных магистралях, когда концентрация примесей в воздухе высока. Соответственно, при статичном периоде опроса датчиков невозможно корректно отследить динамику изменения значений некоторых параметров. Наоборот, при невысокой нагрузке на автомагистрали, например в ночное время суток, целесообразно изменять период опроса в большую сторону для экономии заряда аккумуляторных батарей. При необходимости точного измерения параметров без возможности пропуска одного или нескольких значений используется базовый алгоритм с предварительно сконфигурированным временем опроса подключенных сенсоров.

Результаты и их обсуждение. Для оценки предложенного решения сравним режимы работы измерительного поста для кластерного и классического исполнений устройства [8, 9] (рис. 6). При этом в каждом случае используется установленный набор

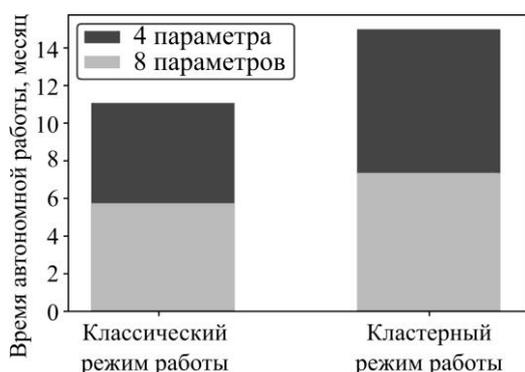


Рис. 6. Расчетные значения времени автономной работы измерительного поста АСМОС
 Fig. 6. Estimated values of the autonomous operation time of the ASMOS measuring station

потребляет до 20 мА в режиме работы и 1,62 мА в режиме сна, модуль ВМЕ280 при измерениях потребляет 1 мА, в режиме сна – 5 мкА. Датчик концентрации углекислого газа потребляет 59 мА в режиме измерений и 7 мкА в режиме сна.

Расчеты показали, что использование кластерного режима работы концентраторов данных в составе измерительного поста АСМОС увеличивает срок автономной работы последнего до 36 % при использовании двух сенсоров, т. е. измерении четырех параметров, и до 34 % при использовании четырех сенсоров, т. е. измерении восьми параметров. Отметим, что при расчете в кластерном режиме работы оба концентратора данных работают в адаптивном режиме.

Введение таймера отправки сетевого пакета с параметром 60 мин в алгоритм работы основного модуля кластерного режима работы измерительного поста позволило повысить расчетное автономное время работы устройства до 15,35 месяцев, что составля-

электронных компонентов и модулей устройства: приемопередающий модуль беспроводной связи RFM 95W; аналогичный Semtech SX1276; мультисенсор температуры, атмосферного давления и влажности окружающей среды ВМЕ280; датчик концентрации углекислого газа МН-Z19В; вычислительные модули Atmel ATmega328P-AU.

Для корректной работы расчетной модели требуется указание потребления электроэнергии для каждого компонента в режиме работы и режиме сна. Так, приемопередающий модуль в режиме передачи потребляет 120 мА, в режиме приема – 12,1 мА, в режиме сна – 0,2 мкА. Вычислительный модуль

ет 39,5 % от времени работы классического режима работы измерительного поста. Это значение получено при сравнении кластерного режима с измерением восьми параметров и классического с измерением четырех параметров.

Заключение. Кластеризация концентратора данных в составе измерительного поста автоматизированной системы мониторинга окружающей среды обеспечена следующими изменениями его аппаратной части. В качестве аппаратной платформы используются вычислительный модуль на базе микроконтроллера Atmel ATmega328P-AU, подключаемые устройства сенсоров, представленные модулями ВМЕ280 и МН-Z19В, которые обеспечивают сбор данных о температуре, влажности, атмосферном давлении окружающей среды, концентрации углекислого газа. В качестве основного приемопередающего модуля используется беспроводной передатчик RFM 95W или Semtech SX1276 с поддержкой протокола LoRa. В качестве интерфейса взаимодействия компонентов кластера применяется шина SPI.

При расчете автономного времени функционирования измерительного поста классического и кластерного режимов работы учтены технические характеристики представленных модулей: потребление электроэнергии в рабочем режиме и режиме сна. Расчет подтвердил значимость кластеризации измерительного поста: расчетные значения времени автономной работы для кластерного режима превышают классический на 36 и 34 % при измерении четырех и восьми параметров соответственно.

Введение функции отложенной передачи данных при кластерном режиме работы измерительного поста с восемью измеряемыми параметрами позволило увеличить расчетное время автономной работы последнего.

Литература

1. *Belov A. A., Proskuryakov A. Yu.* Structures and algorithms of the automated ecological monitoring system of industrial enterprises // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok: IEEE, 2019. P. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934926>
2. *Nurhadi A. A., Darlis D., Murti M. A.* Implementasi modul komunikasi LoRa RFM95W pada sistem pemantauan listrik 3 fasa berbasis IoT // Ultima Computing: Jurnal Sistem Komputer. 2021. Vol. 13. No. 1. P. 17–21. doi: <https://doi.org/10.31937/sk.v13i1.2065>
3. LoRa technology based hydroponic farm monitoring system / *S. Rathod, S. Dhanan, S. S. Harsha et al.* // 2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). Trichy: IEEE, 2021. P. 1–7. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOSEC51865.2021.9591729>
4. *Yousuf A. M., Rochester E. M., Ghaderi M.* A low-cost LoRaWAN testbed for IoT: implementation and measurements // 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). Singapore: IEEE, 2018. P. 361–366. doi: <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355180>
5. *Gupta A. K., Raman A., Kumar N., Ranjan R.* Design and implementation of high-speed universal asynchronous receiver and transmitter (UART) // 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). Noida: IEEE, 2020. P. 295–300. doi: <https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9070856>
6. *Ванройе Н. К., Ечеистов В. В.* Особенности передачи данных по последовательному периферийному интерфейсу SPI // Аллея науки. 2018. Т. 4. № 6 (22). С. 284–289.
7. *Масанов Д. В., Демченко Н. И.* Реализация протокола I2C между Raspberry и Arduino: сб. науч. тр. кафедры автоматизации и промышленной электроники. М.: РГУ им. А. Н. Косыгина, 2021. С. 53–57.
8. *Степанов Г. В., Волкова Е. А., Севрюкова Е. А., Баскаков А. Е.* Разработка математической модели оценки энергоэффективности экологической системы мониторинга // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77. № 2. С. 87–93.
9. *Севрюкова Е. А., Волкова Е. А., Узрватов А. В., Копылова М. Д.* Имитационное моделирование системы мониторинга окружающей среды // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 5. С. 521–529. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529>

Статья поступила в редакцию 20.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.05.2022 г.; принята к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторах

Рябышенков Андрей Сергеевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ryabyshenkov@mail.ru

Волкова Елена Анатольевна – старший преподаватель Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), eavolkova2015@mail.ru

References

1. Belov A. A., Proskuryakov A. Yu. Structures and algorithms of the automated ecological monitoring system of industrial enterprises. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, IEEE, 2019, pp. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934926>
2. Nurhadi A. A., Darlis D., Murti M. A. Implementasi modul komunikasi LoRa RFM95W pada sistem pemantauan listrik 3 fasa berbasis IoT. *Ultima Computing: Jurnal Sistem Komputer*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 17–21. doi: <https://doi.org/10.31937/sk.v13i1.2065>
3. Rathod S., Dhanan S., Harsha S. A., Choudhary S., KP S. LoRa technology based hydroponic farm monitoring system. *2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*. Trichy, IEEE, 2021, pp. 1–7. doi: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934926>
4. Yousuf A. M., Rochester E. M., Ghaderi M. A low-cost LoRaWAN testbed for IoT: implementation and measurements. *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. Singapore, IEEE, 2018, pp. 361–366. doi: <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355180>
5. Gupta A. K., Raman A., Kumar N., Ranjan R. Design and implementation of high-speed universal asynchronous receiver and transmitter (UART). *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. Noida, IEEE, 2020, pp. 295–300. doi: <https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9070856>
6. Vanroye N. K., Echeistov V. V. Features of data transmission over a serial peripheral interface SPI. *Alleya nauki = Alley of Science*, 2018, vol. 4, no. 6 (22), pp. 284–289. (In Russian).
7. Masanov D. V., Demchenko N. I. Implementing the I2C protocol between Raspberry and Arduino. *Sbornik nauchnykh trudov kafedry avtomatiki i promyshlennoy elektroniki = Collection of Scientific Papers of the Department of Automation and Industrial Electronics*. Moscow, Russian State University named after A. N. Kosygin, 2021, pp. 53–57. (In Russian).
8. Stepanov G. V., Volkova E. A., Sevryukova E. A., Baskakov A. E. Development of a mathematical model for assessing the energy efficiency of the ecological monitoring system. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 2, pp. 87–93. (in Russian).
9. Sevryukova E. A., Volkova E. A., Ugrovatov A. V., Kopylova M. D. Imitation simulation of environment monitoring system. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 521–529. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529>

The article was submitted 20.05.2022; approved after reviewing 25.05.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the authors

Andrey S. Riabyshenkov – 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), ryabyshenkov@mail.ru

Elena A. Volkova – Senior Lecturer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), eavolkova2015@mail.ru

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF REPORTS

Краткое сообщение
УДК 548.3:621.382
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-4-559-562

Энергия и амплитуда крутильных колебаний атомов углерода в алмазе

С. А. Неустроев

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

doloto@list.ru

Аннотация. В гексагональной анаморфозе алмаз, как и кубический углерод *c*-C, можно представить в виде гексагональной призмы с базовыми плоскостями – шестиугольниками, в центрах и углах которых находятся атомы углерода. Исходя из факта сохранения межатомного расстояния связи C–C во многих химических соединениях, в частности в этане, можно допустить, что в алмазе межатомное расстояние связей атомов C–C и расположения лигандов также сохраняются. В алмазе при неизменном радиусе сферы атома углерода существенно изменился его заряд, но радиус распространения потенциала в пространстве сохранился. В работе рассмотрено строение ячейки алмаза в гексагональной анаморфозе. Выявлены энергетические параметры крутильных колебаний – энергии и амплитуды – кристалла алмаза с плотнейшей кубической упаковкой. При определении энергии крутильных колебаний атомов углерода в алмазе использована модель этана. Установлено, что избыток энергии крутильных колебаний служит активатором обрабатываемой связи C–C.

Ключевые слова: ячейка алмаза в гексагональной анаморфозе, кубический углерод, энергия крутильных колебаний

Для цитирования: Неустроев С. А. Энергия и амплитуда крутильных колебаний атомов углерода в алмазе // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 559–562. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-559-562>.

Brief report

Carbon atoms' torsional vibrations energy and amplitude in diamond

S. A. Neoustroev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

doloto@list.ru

Abstract. In hexagonal anamorphism a diamond, as well as cubic carbon *c*-C, can be represented as hexagonal prism with basic planes – hexagons at the center and corners of which there are carbon atoms. Proceeding from C–C bonding's interatomic space conservation in many chemical entities, particularly in ethane, one can assume that in

© С. А. Неустроев, 2022

diamond C–C bonding's interatomic space and ligands arrangements are also conserved. In diamond, with crown sphere of carbon atom unchanged, its atomic charge changes significantly but radius of potential extent in space remains the same. In this work, diamond cell structure in hexagonal anamorphism is considered. Torsional vibrations' energetic parameters – energy and amplitude – of diamond crystal with extra close cubic packing have been revealed. Carbon atoms' torsional vibrations energy in diamond was determined using ethane model. It has been established that excess energy of torsional vibrations serves as activator of C–C bonding being formed.

Keywords: diamond cell in hexagonal anamorphism, cubic carbon, torsional vibrations energy

For citation: Neoustroev S. A. Carbon atoms' torsional vibrations energy and amplitude in diamond. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 4, pp. 559–562. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-559-562>

Параметры крутильных колебаний в алмазе – энергию и амплитуду – можно определить с использованием этана как модели энергетического состояния атомов в кристалле кубического углерода [1]. Структурная формула этана $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$ присутствует во многих более сложных соединениях: аланах, конформерах [2], в которых воспроизводится постоянство связи между атомами углерода C–C. В этане атомы водорода находятся в двух плоскостях (по три атома в каждой) [3]. Эти плоскости расположены на концах оси связи C–C перпендикулярно к ней. Вид каждого лиганда – пирамида, в вершине которой находится атом углерода, в основании расположены три атома водорода, разнесенные на 120° . Радиус плоскости окружности равен $(1,534/2) \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,767 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, энергия связи $E_{\text{C-H}} = 413 \text{ кДж/моль}$. Атомы водорода на этих плоскостях расположены противоположно друг другу, их валентности насыщены. Наряду с гармоническими колебаниями атомов углерода в алмазе выявлены локальные (крутильные) колебания, характеризующиеся меньшими значениями амплитуды и энергии (приблизительно 13 кДж/моль). Их присутствие можно сравнить с распределением в пространстве потенциала одиночного атома [4].

Цель настоящей работы – выявление энергетических параметров кристалла алмаза с плотнейшей кубической упаковкой с использованием этана в качестве модели.

Рассмотрим пространственное строение ячейки алмаза. В гексагональной анаморфозе ячейку алмаза, как и ячейку кубического углерода c-C, можно представить гексагональной призмой, имеющей пространственную формулу ...ABCА... Базовые плоскости призмы – шестиугольники, в центрах и углах которых находятся атомы углерода. В гексагональной призме присутствуют элементы строения этана: связи C–C, плоскости нахождения лигандов (рис. 1, а, б, в). Исходя из факта сохранения межатомного расстояния связи C–C во многих десятках соединений, можно допустить, что в алмазе межатомное расстояние связей атомов C–C и расположения лигандов также сохраняются. В алмазе как химическом соединении при неизменном радиусе сферы атома углерода существенно изменился его заряд, но радиус распределения потенциала в пространстве сохранился.

Гексагональная призма (рис. 1, г) состоит из двух базовых плоскостей (шестиугольников) A и $A+1$ и двух промежуточных плоскостей B и C . Атомы углерода на базовых плоскостях находятся в центре и углах гексагонов, а на промежуточных плоскостях занимают лунки, образовавшиеся между сомкнутыми атомами углерода базовых плоскостей. Параметры призмы: $a_h = 1,998422156 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $c_h = 4,895114575 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Расстояние между плоскостями A и B , B и C , а также C и $A+1$ равно $1/3 c_h$, т. е. $1,631704858 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Совмещение этих плоскостей и атомов базовых плоскостей (см. рис. 1, г) имеет вид шестиугольников с шестью разделительными сторонами длиной $1,534 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ (удвоенное значение ортоцентров). Для построения каждого треугольника необходимо два луча, исходящих из центра. Соответственно область крутильного движения представляет собой три лепестка.

Покажем динамику крутильного движения. В момент сближения атомов сторон треугольников (лепестков) энергия взаимодействия достигнет максимума. Это состояние неустойчиво и проявляется «расталкиванием» атомов с последующим ускорением крутильного движения (см. рис. 1, г). Затем следуют торможение атома, достижение максимума энергии, расталкивание, движение в обратную сторону, ускорение и т. д. Сектор этих колебаний ограничен 60° , но из-за нахождения двух атомов (участников колебаний) на плоскостях A и $A+1$ и противоположного направления их движения сектор колебаний снижается до 30° . Энергия их взаимодействия достигает $\approx 13 \text{ кДж/моль}$ [1].

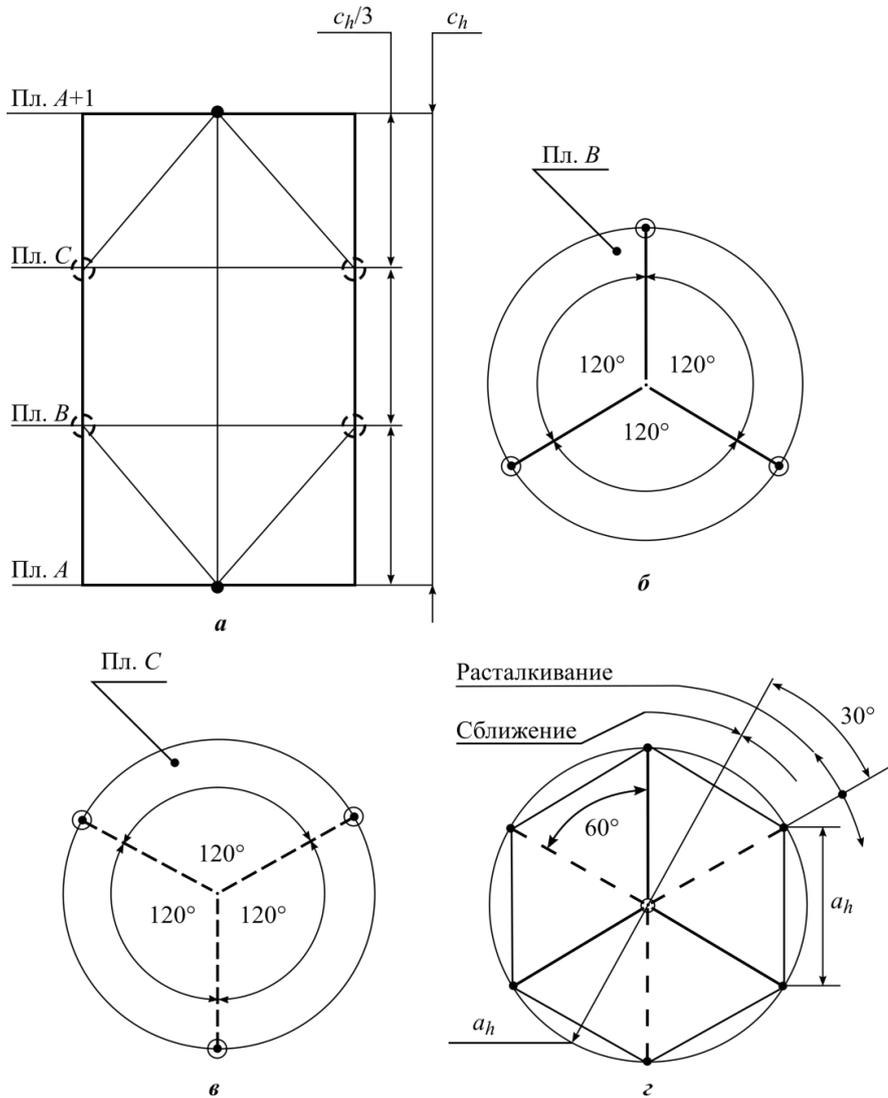


Рис. 1. Вид ячейки кубического углерода в гексагональной анаморфозе: *a* – гексагональная призма, имеющая пространственную формулу ...ABCA...; *b*, *c* – плоскости *B* и *C* соответственно; *d* – совмещение положения связей атомов плоскостей *B* и *C*

Fig. 1. Cubic carbon cell view in hexagonal anamorphosis: *a* – hexagonal prism having stereometrical formula ...ABCA...; *b*, *c* – planes *B* and *C*, respectively; *d* – atomic bonding position coupling in the planes *B* and *C*

Рассчитаем энергию крутильных колебаний атома углерода, входящего в сингонию совершенного кристалла алмаза. В работе [4] приведено уравнение расчета потенциала ϕ (*B*) для одиночного атома с постоянным значением заряда и арифметической прогрессией его распространения в пространстве. Ввод в уравнение других параметров влечет за собой его изменение.

Запишем расчетное уравнение для потенциала ϕ в алмазе:

$$\phi = -(Z_{эфф} / (4\pi\epsilon_a))(1/r_0 - 1/r_1),$$

где $Z_{эфф}$ – величина заряда, равная половине энергии связи; $\epsilon_a = \epsilon_0\epsilon$; $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость (для вакуума $\epsilon = 1$); $\Gamma = 1/r_0 - 1/r_1$ – геометрический фактор.

Данное уравнение отличается от уравнения, представленного в [4], отсутствием предположения об арифметической прогрессии и разделено на два блока: силовой, включающий в себя заряд и свойства физической среды, и геометрический. Также в уравнение введено измененное значение заряда $Z_{эфф}$ (вместо $Q = 4$).

Заряд атома углерода $Z_{\text{эфф}}$ подвержен экранированию, соответственно его действующее значение, равное 4 Кл, снижается до 3,136 Кл [5, 6], в том числе снижается и для каждой связи до $-0,784$ Кл. Подставляя в уравнение численные значения, получаем $0,784 \cdot 9 \cdot 10^9 = 7,056 \cdot 10^9$ Кл·м/Ф. Геометрический фактор представляет собой разность обратных значений радиусов атома углерода $r_0 = 1,534 \cdot 10^{-10}/2 = 0,767 \cdot 10^{-10}$ м и $r_1 = 1,998422156/2 = 0,999211078 \cdot 10^{-10}$ м [4]: $1/r_0 = 1,303780965 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$ и $1/r_1 = 1,000789545 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$. Разность между этими значениями, равная $0,30299142 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$, есть избыток энергии связи, которую можно представить в качестве активатора образующейся связи. При этом энергия, выраженная в электронвольтах, может быть представлена в тепловых единицах: энергия, равная 1 эВ, соответствует температуре 11 610 К [7]. Произведение избытка энергии связи и переводного коэффициента $0,30299142 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1} \cdot 11 610 \text{ К} = 3517,730386 \text{ К}$ показывает затраты энергии двух атомов углерода. Температура нагрева каждого атома связи С–С должна достигнуть $3517,730386/2 = 1758,865193 \text{ К} = 1485,715193 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, избыток энергии крутильных колебаний служит активатором образующейся связи С–С.

Литература

1. Неустроев С. А. Этан как модель энергетического состояния атомов в кристалле кубического углерода // Изв. вузов. Электроника. 2016. Т. 21. № 1. С. 86–87.
2. Каррер П. Курс органической химии / пер. с нем. В. Э. Вассерберга и др.; под ред. М. Н. Колосова. 2-е изд. Л.: Госхимиздат, 1962. XXIV, 1216 с.
3. Краснов К. С. Молекулы и химическая связь. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1984. 295 с.
4. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1968. 488 с.
5. Yorke E. D., De Rocco A. G. Nonadditivity of the potentials for pairs of polyatomic molecules // J. Chem. Phys. 1970. Vol. 53. Iss. 2. P. 764–767. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1674056>
6. Clementi E., Kistenmacher H., Popkie H. Study of the electronic structure of molecules. XVIII. Interaction between a lithium atom and a cyano group as an example of a polytopic bond // J. Chem. Phys. 1973. Vol. 58. Iss. 6. P. 2460–2466. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1679525>
7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.

Краткое сообщение поступило в редакцию 07.12.2021 г.; одобрено после рецензирования 04.02.2022 г.;
принято к публикации 07.07.2022 г.

Информация об авторе

Неустроев Степан Архипович – доктор технических наук, профессор-консультант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), doloto@list.ru

References

1. Neouistroev S. A. Ethane as model of energetic state of atoms in cubic carbon crystal. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 86–87. (In Russian).
2. Karrer P. *Organic chemistry*. Amsterdam, Elsevier Publ., 1950. 983 p.
3. Krasnov K. S. *Molecules and chemical binding*. 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 295 p. (In Russian).
4. Govorkov V. A. *Electric and magnetic fields*. 3rd ed., rev. and upd. Moscow, Energiya Publ., 1968. 488 p. (In Russian).
5. Yorke E. D., De Rocco A. G. Nonadditivity of the potentials for pairs of polyatomic molecules. *J. Chem. Phys.*, 1970, vol. 53, iss. 2, pp. 764–767. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1674056>
6. Clementi E., Kistenmacher H., Popkie H. Study of the electronic structure of molecules. XVIII. Interaction between a lithium atom and a cyano group as an example of a polytopic bond. *J. Chem. Phys.*, 1973, vol. 58, iss. 6, pp. 2460–2466. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1679525>
7. Rayzer Yu. P. *Physics of gas discharge*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 591 p. (In Russian).

The brief report was submitted 07.12.2021; approved after reviewing 04.02.2022;
accepted for publication 07.07.2022.

Information about the author

Stepan A. Neouistroev – Dr. Sci. (Eng.), Consulting Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), doloto@list.ru

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 декабря 2021 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, 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. Векторные рисунки представляются в формате файла *.SVG (версии 1.1). Для выполнения иллюстраций рекомендуется использовать свободно распространяемый векторный редактор Inkscape 0.92 (официальный сайт <https://inkscape.org>). Текст и линии на рисунке должны быть редактируемыми (текст не «в кривых»).

2. Полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в формате TIFF (без компрессии). **Использование MS Word не допускается.**

3. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок должен быть представлен в отдельном файле. Формат рисунков не должен превышать 15×22 см. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подписанные 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@miec.ru

<http://ivuz-e.ru>

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>

