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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 29
№ 5
сентябрь – октябрь

Vol. 29
No. 5
September – October

2024

ПОДПИСКА 2025

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

Периодичность журнала – 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» (подписной индекс 47570): https://www.ural-press.ru/catalog
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- ООО «Руспресса»: http://abcpress.ru/
- ООО «ГЛОБАЛПРЕСС»: globalpress.ms@mail.ru
- подписное агентство «Криэйтив Сервис Бэнд»: https://periodicals.ru/
- редакцию – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 29, № 5, 2024
сентябрь – октябрь

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

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Громов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4563-9831
Душкин Александр Викторович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Коноплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Мещеряков Роман Валерьевич – д.т.н., проф., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1129-8434
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© «Известия вузов. Электроника», 2024
© МИЭТ, 2024

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
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орёл, Россия), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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

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

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

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

Подписано в печать 07.10.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 16,74 усл.печ.л., 14,248 уч.-изд.л. Тираж 140 экз. Заказ № 15. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

Журнал включен ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим специальностям:

1.3.5. Физическая электроника (технические науки, физико-математические науки)
1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки, физико-математические науки)
1.3.11. Физика полупроводников (технические науки, физико-математические науки)
1.3.12. Физика магнитных явлений (технические науки, физико-математические науки)
2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)
2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (технические науки, физико-математические науки)
2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки)
2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, в Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index. Является членом Crossref.

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

Сазонов В. А., Боргардт Н. И., Приходько А. С., Казаков И. П., Клековкин А. В. Исследование структуры слоев GaAs в гетерокомпозициях GaAs/Ge/GaAs методами просвечивающей электронной микроскопии 559

Материалы электроники

Скрипаль А. В., Трунилин Н. А., Яфаров Р. К. Влияние инжекции электронов и температуры на газовую чувствительность алмазографитовых пленочных структур к парам воды 575

Технологические процессы и маршруты

Жангиреев Д., Шемякин А. В., Белостоцкая С. О., Сивченко А. С. Методика оптимизации электрофизических характеристик МОП-транзистора с использованием приборно-технологического моделирования 585

Элементы интегральной электроники

Сауров М. А., Лакалин А. В., Путря М. Г. Расчет КПД фотодиода при наличии генерации и рекомбинации в области пространственного заряда 595

Зеневич А. О., Кочергина О. В., Буслюк В. В., Федосюк Д. Н., Лущий Д. А. Температурные характеристики шумовых диодов 608

Егоркин В. И., Чуканова О. Б. Нормально-закрытые GaN-транзисторы для комплементарной пары 616

Штерн Ю. И., Штерн М. Ю., Рогачев М. С., Кожевников Я. С. Термоэлектрические системы для прецизионного регулирования температуры 625

Схемотехника и проектирование

Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А., Харитонов И. А., Корнеев С. В., Дюканов П. А., Смирнов Д. С., Вологдин Э. Н. Анализ влияния радиационных эффектов на характеристики операционного усилителя с использованием универсальной SPICE-RAD-модели биполярных транзисторов 640

Бибило П. Н., Кардаш С. Н., Романов В. И. Выбор блочных покрытий при схемной реализации разреженных систем дизъюнктивных нормальных форм булевых функций 658

Информационно-коммуникационные технологии

Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Конюхов Е. В. Управление параметрами исполнительного оборудования при автоматизации сборочных операций 679

Гундарцев М. А., Семенов М. Ю., Калашников В. С., Королев В. В., Константинова А. А. Особенности разработки программной документации по стандартам ЕСПД для САПР микроэлектроники 687

Конференции

Об итогах International Conference “Functional Chalcogenides: Physics, Technology and Applications” 694

К сведению авторов 695

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 29, No. 5, 2024
September – October
The scientifical and technical journal
Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

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

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2024
© MIET, 2024

Roman V. Meshcheryakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1129-8434
Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377
Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)
Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Orel State University named after I. S. Turgenev (Orel, Russia), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vyacheslav V. Svetukhin – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMC "Technological Centre" (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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

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

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

Signed to print 07.10.2024. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 16,74. Number of copies 140. Order no. 15. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

The journal is included into the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of thesis for candidate of science and doctor degrees must be published for the following specialties:

1.3.5. Physical electronics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.8. Condensed matter physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.11. Semiconductor physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.12. Physics of magnetic phenomena (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.1. Vacuum and plasma electronics (Engineering Sciences)
2.2.2. Electronic component base of micro- and nanoelectronics, quantum devices (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.3. Technology and equipment for electronic materials and devices production (Engineering Sciences)
2.2.8. Material, product, substance and natural environment control and diagnostic techniques and devices (Engineering Sciences)
2.3.1. System analysis, information handling and processing (Engineering Sciences)
2.3.3. Process industries automation and control (Engineering Sciences)
2.3.5. Mathware and software for computer systems, complexes and networks (Engineering Sciences)

The journal is included into the Russian Science Citation Index on the Web of Science basis, into the Russian index of scientific citing and into the Rating Science Index. Is the member of Crossref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue "Russian Press" LLC "Agency "Book-Service" – 38934.
The subscription index in catalogue "Periodicals. Newspapers and magazines" LLC "Ural-Press Okrug" – 47570.

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

CONTENTS

Fundamental researches

Sazonov V. A., Borgardt N. I., Prikhodko A. S., Kazakov I. P., Klekovkin A. V. Structural investigation of GaAs layers in GaAs/Ge/GaAs heterostructures by transmission electron microscopy 559

Electronics materials

Skripal A. V., Trunilin N. A., Yafarov R. K. Effect of electron injection and temperature on the gas sensitivity to water vapor of diamond-graphite film structures 575

Technological processes and routes

Zhangireyev D., Shemyakin A. V., Belostotskaya S. O., Sivchenko A. S. A procedure for optimizing the electro-physical characteristics of the MOSFET using device and process simulation 585

Integrated electronics elements

Saurov M. A., Lakalin A. V., Putrya M. G. Efficiency calculation of photodiode with generation and recombination in the space charge region 595

Zenevich A. O., Kochergina O. V., Buslyuk V. V., Fedosyuk D. N., Luschiy D. A. Temperature characteristics of noise diodes 608

Egorkin V. I., Chukanova O. B. Normally-off GaN *p*-channel transistor for complementary pair 616

Shtern Yu. I., Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Kozhevnikov Ya. S. Thermoelectric systems for precision temperature control 625

Circuit engineering and design

Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V., Popov D. A., Kharitonov I. A., Korneev S. V., Dukanov P. A., Smirnov D. S., Vologdin E. N. Analysis of radiation exposure effects on the characteristics of an operational amplifier using the universal SPICE-RAD model of bipolar transistors 640

Bibilo P. N., Kardash S. N., Romanov V. I. Selection of block coverage for schematic implementation of sparse systems of disjunctive normal forms of Boolean functions 658

Information-communication technologies

Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Konyukhov E. V. Controlling parameters of driven equipment when automating assembly operations 679

Gundartsev M. A., Semenov M. Yu., Kalashnikov V. S., Korolev V. V., Konstantinova A. A. Features of the development of software documentation compliant with USPD standards for microelectronics CAD 687

Conferences

On summation of International Conference “Functional Chalcogenides: Physics, Technology and Applications” 694

Instruction for authors 695

Научная статья
УДК 620.187.3:548.4
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-559-574
EDN: GPPNHA

Исследование структуры слоев GaAs в гетерокомпозициях GaAs/Ge/GaAs методами просвечивающей электронной микроскопии

***В. А. Сазонов*[1], *Н. И. Боргардт*[1], *А. С. Приходько*[1], *И. П. Казаков*[2], *А. В. Клековкин*[2]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия*

vadim_sazonov_92@mail.ru

Аннотация. Для создания устройств, работающих в терагерцовом диапазоне, и топологических изоляторов представляют интерес гетерокомпозиции с активной областью на основе слоев GaAs/Ge/GaAs. Оптические и электрофизические свойства таких приборов во многом зависят от технологических условий их формирования. В работе исследована структура слоев GaAs в гетерокомпозициях GaAs/Ge/GaAs, выращенных на подложке GaAs(001) методом молекулярно-пучковой эпитаксии при технологических условиях, обеспечивающих разворот кристаллических решеток верхнего и нижнего слоев GaAs на 90° для образцов одного типа и не приводящих к такому развороту для образцов другого типа. Сформированные гетерокомпозиции исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии и электронографического анализа с использованием тонкой фольги поперечного сечения, приготовленной с применением метода фокусированного ионного пучка. Установлено, что слои GaAs/Ge/GaAs имеют высокое кристаллическое совершенство для обоих типов образцов, но в слоях GaAs, расположенных над слоем Ge, образуются дефекты упаковки и антифазные домены. Идентификация взаимной ориентации верхнего и нижнего слоев GaAs в GaAs/Ge/GaAs выполнена путем сравнения распределения интенсивности в дисках $00\bar{2}$ и 002 на дифракционных картинах, полученных при дифракции сходящегося электронного пучка. На основе моделирования таких картин показано, что ориентация образца вдоль оси зоны [310] является оптимальной для выявления различий в дифракционных узорах в псевдозапрещенных дисках $00\bar{2}$ и 002. Экспериментальные дифракционные картины, полученные при

© В. А. Сазонов, Н. И. Боргардт, А. С. Приходько, И. П. Казаков, А. В. Клековкин, 2024

таких условиях, позволили подтвердить одинаковую ориентацию кристаллических решеток верхнего и нижнего слоев GaAs в образцах одного типа и разворот решеток этих слоев на 90° вокруг направления [001] в образцах другого типа.

Ключевые слова: гетероструктуры на основе GaAs, молекулярно-пучковая эпитаксия, просвечивающая электронная микроскопия, антифазные домены, дифракция в сходящемся пучке, дефекты кристаллической структуры

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

Для цитирования: Исследование структуры слоев GaAs в гетерокомпозициях GaAs/Ge/GaAs методами просвечивающей электронной микроскопии / В. А. Сазонов, Н. И. Боргардт, А. С. Приходько и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 559–574. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-559-574. – EDN: GPPNHA.

Original article

Structural investigation of GaAs layers in GaAs/Ge/GaAs heterostructures by transmission electron microscopy

V. A. Sazonov[1], N. I. Borgardt[1], A. S. Prikhodko[1], I. P. Kazakov[2], A. V. Klekovkin[2]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

vadim_sazonov_92@mail.ru

Abstract. Heterostructures with an active region based on GaAs/Ge/GaAs layers are of interest for developing devices operating in the terahertz range and for topological insulators. Optical and electrophysical properties of such devices depend largely on their formation process specifications. In this work, a structure of GaAs layers in GaAs/Ge/GaAs heterostructures grown on a GaAs(001) substrate by molecular beam epitaxy, with specific growth conditions resulting in a 90° rotation of the crystal lattices between the upper and lower GaAs layers in one type of samples and no such rotation in samples of another type, was investigated. Subsequent analysis of the formed heterostructures was performed by transmission electron microscopy and electron diffraction analysis using thin cross-section foils prepared via the focused ion beam method. It has been established that the GaAs/Ge/GaAs layers exhibited high crystalline perfection in both types of samples; however, stacking faults and antiphase domains are formed in the GaAs layers positioned above Ge layer. The relative orientation of the upper and lower GaAs layers in GaAs/Ge/GaAs structures was determined by comparing the intensity distribution in disks $00\bar{2}$ and 002 in the diffraction patterns obtained by convergent beam electron diffraction. Simulation of these patterns demonstrated that orientation of the sample along the [310]

zone axis is optimal for identification of differences in diffraction patterns within the pseudo-forbidden disks $00\bar{2}$ and 002 reflections. Experimental diffraction patterns obtained under these conditions have allowed the confirmation of identical orientation of the crystal lattices between the upper and lower GaAs layers in one type of samples while revealing a 90° rotation of these lattices around the [001] direction in the other type.

Keywords: GaAs-based heterostructures, molecular beam epitaxy, transmission electron microscopy, antiphase domains, convergent beam electron diffraction, crystal structure defects

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state task (Agreement FSMR-2024-0004) and using the equipment of the CCP "Diagnostics and modification of microstructures and nanoobjects".

For citation: Sazonov V. A., Borgardt N. I., Prikhodko A. S., Kazakov I. P., Klekovkin A. V. Structural investigation of GaAs layers in GaAs/Ge/GaAs heterostructures by transmission electron microscopy. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 559–574. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-559-574. – EDN: GPPNHA.

Введение. Гетерокомпозиции GaAs/Ge/GaAs применяются в качестве топологических изоляторов [1, 2], устройств, работающих в терагерцовом диапазоне [3, 4]. Оптические и электрофизические свойства таких приборов во многом зависят от технологических условий их формирования, которые обусловливают как образование кристаллических дефектов в слоях GaAs, так и целенаправленное формирование локальных областей с регулярной доменной структурой [5, 6].

Во время гетероэпитаксиального роста в слоях могут образовываться несовершенства кристаллической структуры, такие как антифазные домены [7–9] и дефекты упаковки [10–12]. Их негативное влияние на параметры приборов подтверждается, в частности, результатами работы [13], согласно которым при эпитаксиальном росте бездефектного слоя GaAs на слое Ge интенсивность фотолюминесценции возрастает в несколько раз. Формирование локальных областей с регулярной доменной структурой связано с понятием полярности слоя GaAs и заключается в осаждении на неполярном слое Ge первого слоя, состоящего из атомов Ga или As.

Для исследования гетероструктур используются методы атомно-силовой микроскопии [14], рентгеновской дифракции [15], рамановской спектроскопии [16] и атомно-силовой микроскопии [14]. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) позволяет всесторонне характеризовать полученные гетероструктуры, в том числе кристаллическое совершенство и полярность сформированных слоев [17, 18], наличие и типы дефектов структуры [19], выявлять особенности атомарного строения [10], идентифицировать и количественно оценивать поля деформации, возникающие из-за различий параметров решетки сформированных слоев [20, 21].

В настоящей работе изучаются слои GaAs/Ge/GaAs многослойной гетерокомпозиции, выращенной на подложке GaAs. Дефекты кристаллической структуры сформированного на слое Ge слоя GaAs исследуются методами ПЭМ. Анализ ориентации кристаллических решеток слоев GaAs, расположенных выше и ниже слоя Ge, выполняется с применением дифракции в сходящемся пучке.

Образцы и экспериментальные методы. Многослойные гетерокомпозиции [6], содержащие слои GaAs/Ge/GaAs (таблица), выращивали на полуизолирующих подложках GaAs(100), разориентированных на 3° в направлении (111), методом молекулярно-

Схема гетерокомпозиций на основе GaAs/Ge/GaAs
Scheme of heterocompositions based on GaAs/Ge/GaAs

Номер слоя	Состав слоев	Толщина слоя, нм	Установка
7	*i*-GaAs	20	«ЦНА-25»
6	*i*-AlAs	20	
5	*i*-GaAs	100	
4	Ge	9	«Катунь»
3	*i*-GaAs	20	«ЦНА-25»
2	*i*-AlAs	20	
1	*i*-GaAs	300	
Подложка GaAs(001) 3° → (111)Ga			

пучковой эпитаксии на установках «ЦНА-25» и «Катунь» (Россия). Кристаллическое совершенство слоев контролировали методом дифракции быстрых электронов в процессе выращивания гетероструктур. Эпитаксиальный слой GaAs толщиной 20 нм, расположенный под слоем Ge, формировали на установке «ЦНА-25» при температуре 590 °C и эквивалентном давлении паров As_4 $P_{As} = 6 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. со скоростью 0,18 нм/с. Рост осуществлялся на реконструированной поверхности подложки GaAs(2x4). После остывания до комнатной температуры образцы перемещали в установку «Катунь», где осуществлялся рост эпитаксиального слоя Ge при температуре 270 °C со скоростью 0,05 нм/с. Далее образцы с ранее сформированной структурой GaAs/Ge возвращали в установку «ЦНА-25», после чего выращивали слои GaAs при разных условиях роста. Образец 1 отжигали при температуре 630 °C с закрытым вентилем источника As_4. Образец 2 отжигали при температуре 600 °C и открытом вентиле источника As_4 с четырехкратным повышением эквивалентного давления паров As_4 до значений $P_{As} = 5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. После отжига проводили охлаждение образцов 1 и 2 при закрытом вентиле источника As_4, далее формировали слой GaAs на слое Ge со скоростью 0,18 нм/с. Подробнее процесс формирования гетероструктур описан в работе [6].

Тонкую фольгу толщиной около 10 и 80 нм приготавливали с применением фокусированного пучка ионов Ga в электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 650. Для получения сечений образцов с ориентациями поверхности (110) и (310) использовали стандартную методику *in-situ lift out* [22].

Электронно-микроскопические исследования проводили на приборе Titan Themis 200, оборудованом корректором сферической аберрации и цифровой камерой BM-Ceta, при ускоряющем напряжении 200 кВ. Светлопольные изображения ПЭМ и дифракционные картины получали при плоскопараллельном освещении образцов. Высокоразрешающие просвечивающие растровые электронно-микроскопические (ПРЭМ) изображения формировали при эффективной длине камеры 210 мм с применением программного пакета Thermo Fisher Scientific Velox. Дифракционные картины в сходящемся пучке получали в режиме ПРЭМ при отключенном сканировании электронного пучка в программном пакете Thermo Fisher Scientific TEM Imaging & Analysis.

Визуализация слоев гетерокомпозиции. На рис. 1, *а* приведено светлопольное ПЭМ-изображение поперечного сечения, параллельного плоскости (110) образца 2. Его получали в двухлучевых условиях при малом отклонении от оси зоны [110] с ориентацией в отражающее положение одной из систем плоскостей {002} с применением диафрагмы объективной линзы, пропускающей только прошедший пучок. На изобра-

жении визуализируются буферный слой GaAs(buf) и слои AlAs, GaAs, Ge, GaAs, AlAs и GaAs, эпитаксиально выращенные на подложке GaAs(sub)(100). Из представленного ПЭМ-изображения следует, что слои GaAs под слоем Ge и слой Ge являются однородными по толщине в латеральном направлении.

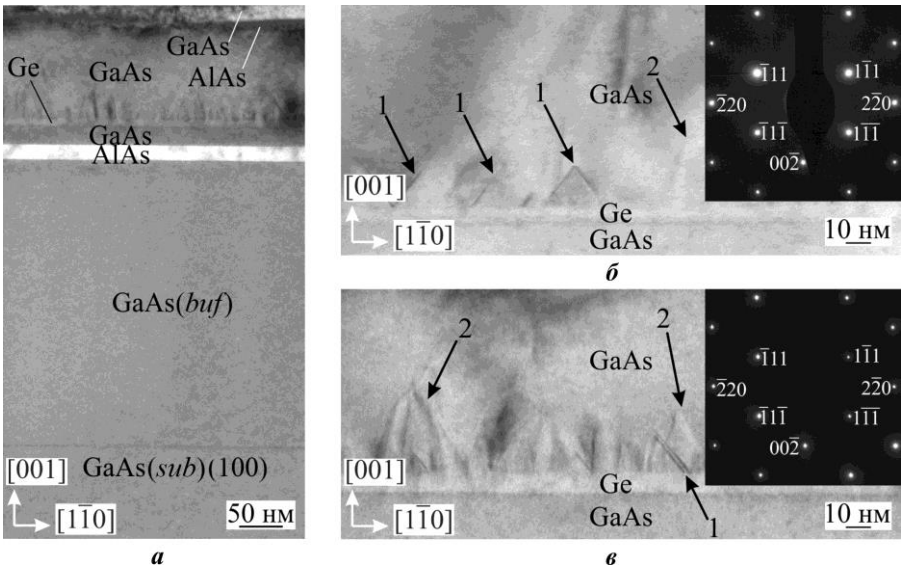


Рис. 1. Светлопольные ПЭМ-изображения слоев гетерокомпозиции образца 2 (*а*), эпитаксиальных слоев GaAs/Ge/GaAs образцов 1 (*б*) и 2 (*в*). Вставки – соответствующие дифракционные картины; 1, 2 – несовершенства кристаллической структуры

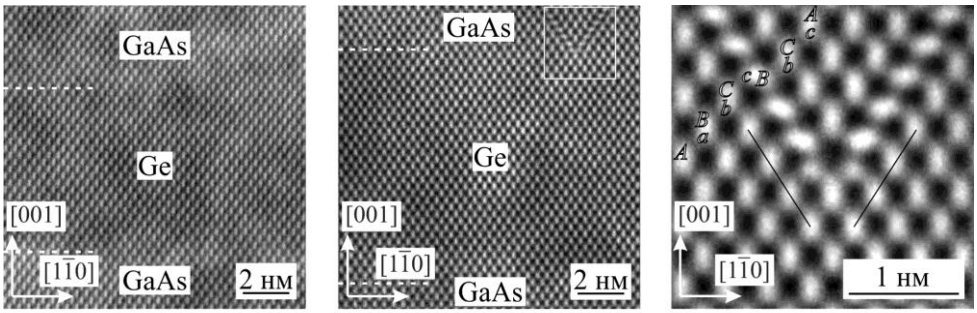
Fig. 1. Bright-field TEM images of heterostructure layers of sample 2 (*a*), of epitaxial layers GaAs/Ge/GaAs in samples 1 (*b*) and 2 (*c*). The insets represent corresponding diffraction patterns; 1, 2 – imperfections of the crystal structure

Более детальное представление о структуре слоев GaAs/Ge/GaAs, обеспечивающих функциональные свойства сформированных гетероструктур, дают увеличенные светлопольные ПЭМ-изображения образцов 1 и 2 (рис. 1, *б*, *в*), сформированные в таких же двухлучевых условиях, как ПЭМ-изображения на рис. 1, *а*. Точечный вид рефлексов на дифракционных картинах, полученных от областей диаметром 150 нм со слоями GaAs/Ge/GaAs, свидетельствует об их монокристаллической структуре. Толщина слоя GaAs образца 1, выращенного на слое Ge, варьируется от 80 до 120 нм, а образца 2 – от 75 до 110 нм.

Для обоих образцов в слое GaAs, выращенном на слое Ge, выявляются два типа несовершенств кристаллической структуры. Одни из них, отмеченные на рис. 1, *б*, *в* стрелками 1, визуализируются в виде тонких темных линий, параллельных плоскостям $(1\bar{1}1)$ и $(\bar{1}11)$, и согласно данным [23, 24] представляют собой дефекты упаковки. Несовершенства второго типа, отмеченные на рис. 1, *б*, *в* стрелками 2, имеют куполообразный вид и, как правило, визуализируются в виде областей повышенной интенсивности на светлопольных изображениях. Сравнение полученных изображений с результатами, описанными в работах [25–27], показало, что эти дефекты являются антифазными доменами. Данный тип дефектов ограничивается антифазными границами, и их формирование обусловлено наличием моноатомных ступеней на границе раздела эпитаксиальных слоев [27]. В процессе роста антифазные границы могут изменять свой наклон (изгибаться), встречаться с соседней антифазной границей и формировать антифазный домен [28, 29].

Для обоих образцов положения границ разделов слоев GaAs и Ge определены с использованием темнопольных изображений, полученных в двухлучевых условиях с ориентацией в отражающее положение рефлекса 002. Распределения интенсивности в окрестности границ между слоями усредняли вдоль направления $[1\bar{1}0]$ в пределах области шириной около 20 нм, в которой отсутствовали дефекты кристаллической структуры. Полученные профили интенсивности в приграничных областях аппроксимировались двумя функциями ошибок для определения положений границ между слоем Ge и расположенными ниже и выше слоями GaAs. На этих профилях границе соответствовала точка, в которой интенсивность равнялась среднему значению интенсивностей в удаленных от границы областях смежных слоев. Расстояния между найденными положениями границ определяли толщину слоя Ge, которая в образцах 1 и 2 составила 7 и 10 нм соответственно.

Высокоразрешающие ПРЭМ-изображения образцов 1 и 2, визуализирующие атомарную структуру слоев Ge и прилегающих к нему слоев GaAs, приведены на рис. 2, *а*, *б*, на которых обозначены примерные положения границ между слоями. Увеличенное ПРЭМ-изображение дефекта V-образной формы, выделенного прямоугольником на рис. 2, *б*, на границе раздела слоев GaAs и Ge показано на рис. 2, *в*, на котором отмечены плоскости $(1\bar{1}1)$ и $(\bar{1}11)$. В идеальной решетке GaAs плоскости {111} имеют чередование *AaBbCcAaBbCcAaBbCc*. Дефект упаковки вычитания формируется путем удаления одной пары плоскостей {111}, например *A* и *a*, в результате чего чередование изменяется на *AaBbCc|BbCcAaBbCc* или *ABC|BCABC*, поскольку плоскости удаляются парами. Следовательно, несовершенства (см. рис. 2, *в*) являются дефектами упаковки вычитания.



а *б* *в*

Рис. 2. Высокоразрешающие ПРЭМ-изображения слоев GaAs/Ge/GaAs образцов 1 (*а*) и 2 (*б*) и увеличенное изображение выделенной области на рис. 2, *б* с дефектами упаковки (*в*): белые штриховые линии – положения границ между слоями; черные линии – плоскости {111}; *A*, *a*, *B*, *b*, *C*, *c* – плоскости $(1\bar{1}1)$

Fig. 2. High-resolution STEM images of GaAs/Ge/GaAs layers in samples 1 (*a*) and 2 (*b*) and enlarged STEM image of the selected square area on fig. 2, *b* containing stacking faults (*c*): the white dotted lines show the positions of the boundaries between the layers; the planes {111} are marked with black lines; the letters *A*, *a*, *B*, *b*, *C*, *c* indicate the planes $(1\bar{1}1)$

Для идентификации несовершенств, отмеченных стрелками 2 на рис. 1, *б*, *в*, использовали ПРЭМ-изображение (рис. 3, *а*), на котором выявлены три дефекта, ориентированных по-разному. Сравнение с данными, приведенными в работе [9], указывает на то, что эти дефекты представляют собой три части антифазной границы. В нижней части слоя ее ширина составляет 9 нм, и при оцененной толщине образца около 10 нм антифазная граница проходит параллельно плоскости (100), которая соответствует антифазной границе 2-го типа [30]. Далее антифазная граница ориентирована

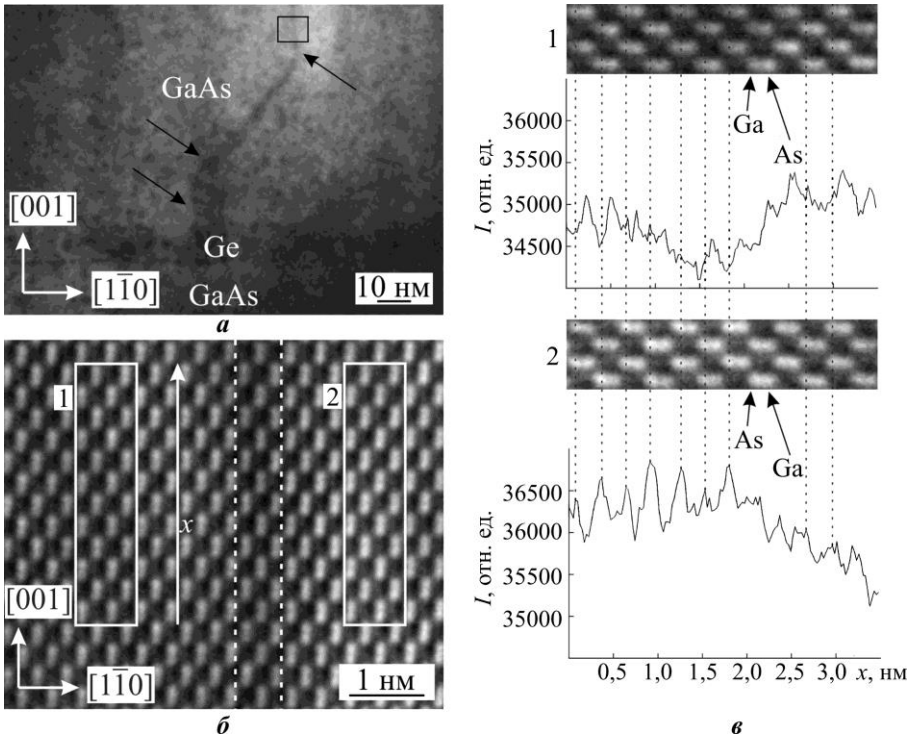


Рис. 3. ПРЭМ-изображение антифазного домена (*а*), высокоразрешающее изображение выделенной на рис. 3, *а* области с антифазной границей (*б*) и изображения выделенных на рис. 3, *б* областей 1 и 2 с соответствующими усредненными профилями интенсивности (*в*). Стрелки на рис. 3, *а* – антифазная граница шириной ~ 1 нм

Fig. 3. STEM image of the antiphase domain (*a*), high-resolution image of the area highlighted on fig. 3, *a* from the antiphase boundary (*b*), images of the areas marked with numbers 1 and 2 on fig. 3, *b* with corresponding averaged intensity profiles (*c*). The arrows on fig. 3, *a* indicate the antiphase boundary with a width ~ 1 nm

параллельно плоскости $(\bar{1}11)$, толщина границы постепенно уменьшается от 9 нм в ее нижней части и до 2 нм в ее верхней части. Эта граница представляет собой антифазную границу 2-го типа [30]. В верхней части слоя GaAs эта граница расположена параллельно плоскости $(1\bar{1}0)$, ее ширина не превышает 2 нм и постепенно уменьшается в направлении роста. Данная граница относится к антифазной границе 1-го типа [30].

Для непосредственного подтверждения характерного изменения порядка в расположении атомов Ga и As дополнительно исследовали антифазную границу в области, обозначенной прямоугольным контуром на рис. 3, *а*. Для минимизации влияния шумов высокоразрешающее ПРЭМ-изображение (рис. 3, *б*) получали путем усреднения серии из 70 высокоразрешающих микрофотографий с последующей фильтрацией с применением радиального фильтра Винера в программном пакете Thermo Fisher Scientific Velox. На рис. 3, *в* представлены фрагменты изображения и усредненные профили интенсивности от областей 1 и 2 (см. рис. 3, *б*), демонстрирующие изменение порядка расположения колонок атомов Ga и As по обе стороны от антифазной границы. Профили интенсивности строили в направлении [001] путем усреднения изображений вдоль направления $[1\bar{1}0]$ в пределах прямоугольных областей 1 и 2. Вертикальные пунктирные линии, использованные при сопоставлении изображений и профилей интенсивностей на рис. 3, *в*, позволили установить, что позициям максимумов интенсивности на профилях для области 2 соответствуют положения минимумов для области 1.

Дифракционные картины в сходящемся пучке. При выращивании слоев GaAs на слое Ge использовали условия роста, при которых кристаллические решетки этих слоев образцов 1 и 2 должны иметь различную ориентацию относительно нижерасположенного слоя GaAs. Выявление такого разворота кристаллической решетки верхнего слоя GaAs относительно решетки нижнего слоя на 90° вокруг направления [001] в одном из исследованных образцов с помощью высокоразрешающих ПРЭМ-изображений, показанных на рис. 2, *а*, *б*, затруднительно. Однако подобный разворот может быть обнаружен на основе анализа дифракционных картин в сходящемся пучке, полученных при высокосимметричной ориентации образца вдоль оси зоны и состоящих из дифракционных дисков. Распределение интенсивности в них представляет собой разнообразные узоры, вид которых зависит как от материала и толщины образца, так и от его ориентации относительно падающего электронного пучка. Поскольку атомные факторы рассеяния электронов для Ga и As немного отличаются друг от друга, то на дифракционной картине при соответствующей ориентации образца возникают псевдозапрещенные диски отражений $00\bar{2}$ и 002. Различия в распределении интенсивности в этих дисках могут быть использованы для выявления разворотов кристаллических решеток слоев GaAs, расположенных выше и ниже слоя Ge в структуре GaAs/Ge/GaAs.

Для определения оси зоны и диапазона толщин, для которых дифракционные узоры для дисков $00\bar{2}$ и 002 максимально отличаются друг от друга, выполняли моделирование дифракционных картин в сходящемся пучке с применением формализма блоховских волн в программном пакете EMS [31, 32]. Расчетные дифракционные картины получали при ориентации образца относительно оптической оси микроскопа вдоль направлений [100], [110], [210], [310] и [$\bar{1}$30], поскольку согласно работе [33] для осей зоны типа [*uv*0] проявляются наиболее сильные различия в узорах псевдозапрещенных рефлексов. Длина камеры составляла 460 мм, полуугол сходимости электронного пучка принимали равным 3,48 мрад, что позволило избежать наложения дисков друг на друга на дифракционных картинах. Толщину образца меняли с шагом 1 нм от 50 до 199 нм, а количество дифрагированных пучков, вносящих вклад в формирование дифракционных картин, задавали равным 22 для оси зоны [110] и 24 для осей зон [100], [210], [310] и [$\bar{1}$30]. Модель кристалла GaAs строили с учетом пространственной группы $F\bar{4}3m$, параметра решетки 0,5653 нм и позиций атомов Ga (0, 0, 0), As (1/4, 1/4, 1/4).

На рис. 4 показаны схемы расположения атомных колонок и распределения интенсивности на расчетных дифракционных картинах для различных ориентаций образца при его толщине 30, 50 и 70 нм. Из рисунка видно, что при толщине образца 30 нм различия в узорах дисков $00\bar{2}$ и 002 визуально практически не выявляются для всех осей зон. При толщине образца 50 и 70 нм различия узоров в дисках типа 002 малозаметны для дифракционных картин, сформированных в осях зон [100] и [210], выявляются на картинах, полученных в оси зоны [110], и становятся значительными при ориентации образца вдоль направления [310]. В последних двух случаях расположение колонок атомов Ga и As в отражающих падающие электроны плоскостях (002) асимметрично относительно проходящих, например, через атомы As вертикальных сечений, отмеченных на рис. 4 пунктирной линией.

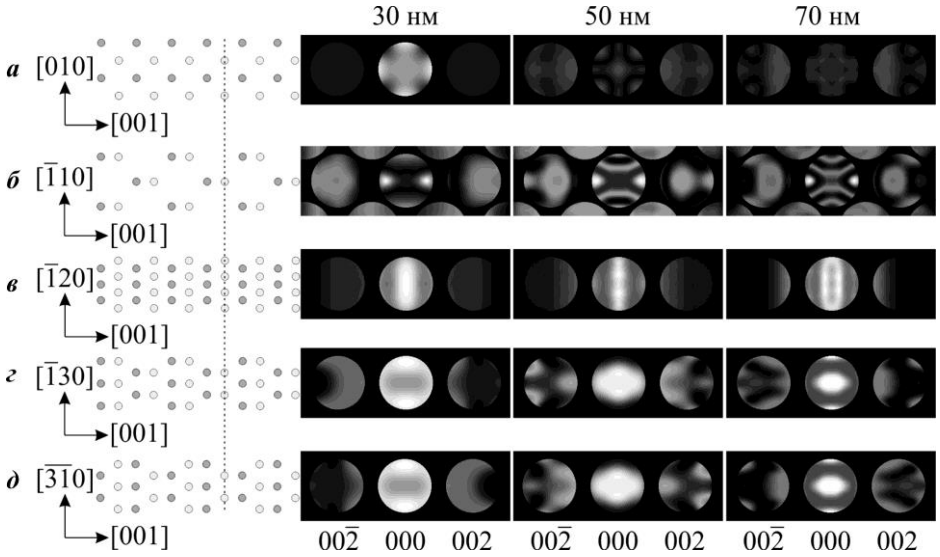


Рис. 4. Схемы атомных колонок кристалла GaAs в осях зоны [100] (*а*), [110] (*б*), [210] (*в*), [310] (*г*) и [$\bar{1}$30] (*д*) и соответствующие им расчетные дифракционные картины в сходящемся пучке при разной толщине образца: пунктирная линия – плоскость (001), проходящая через атомы галлия

Fig. 4. Schematic representation of the atomic columns of the GaAs crystal for the axes of the zone [100] (*a*), [110] (*b*), [210] (*c*), [310] (*d*) and [$\bar{1}$30] (*e*) and the corresponding simulated convergent beam electron diffraction patterns at different sample thickness: the dotted line in the schematic representation shows the plane (001) passing through the gallium atoms

Существенные различия в распределениях интенсивности в дисках $00\bar{2}$ и 002 на дифракционных картинах в оси зоны [310] обусловлены, по-видимому, тем, что при такой ориентации образца не возбуждаются высокоинтенсивные отражения типа 111. Поэтому на таких картинах относительная интенсивность отражений типа 002 велика по сравнению с дифракционными картинами, полученными в оси зоны [110]. Если кристаллическую решетку GaAs, изначально ориентированную вдоль оси зоны [310], развернуть на 90° вокруг направления [001], то падающий электронный пучок окажется параллельным оси зоны [$\bar{1}$30]. Полученные в этом случае дифракционные картины (рис. 4, *д*) будут аналогичны картинам на рис. 4, *г* после их поворота на 180° вокруг вертикальной оси, проходящей через центр диска 000.

Для количественной характеризации различий, возникающих в дифракционных дисках $00\bar{2}$ и 002 при разных ориентациях образца, в зависимости от толщины t образца распределения интенсивности I_{002} и $I_{00\bar{2}}$ в этих дисках сравнивали друг с другом с применением R-фактора [34]:

$$R\left(I_{00\bar{2}}, I_{002}, t\right) = \sqrt{\frac{\left(\sum\limits_{x_i, x_i'=1}^{N} \sum\limits_{y_i, y_i'=1}^{N} I_{00\bar{2}}\left(x_i, y_i, t\right) - I_{002}\left(x_i', y_i', t\right)\right)^2}{\left(\sum\limits_{x_i, x_i'=1}^{N} \sum\limits_{y_i, y_i'=1}^{N} \frac{I_{00\bar{2}}\left(x_i, y_i, t\right) + I_{002}\left(x_i', y_i', t\right)}{2}\right)^2}},$$

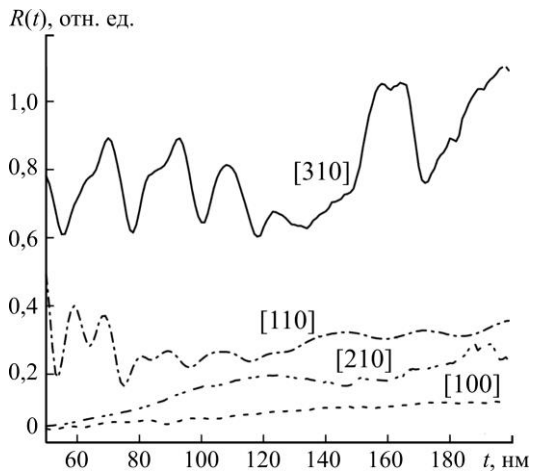


Рис. 5. Зависимость *R*-фактора *R*(*t*) от толщины образца при его ориентации относительно электронного пучка в осях зоны [100], [110], [210], [310]

Fig. 5. Dependence of the *R* factor *R*(*t*) on the thickness of the specimen oriented relative to the electron beam in the axes of the zone [100], [110], [210], [310]

где N – количество точек изображения диска при выбранном шаге его дискретизации вдоль горизонтальной оси x и вертикальной оси y; (x_i, y_i) и $(x_i^{'}, y_i^{'})$ – координаты симметрично расположенных эквивалентных точек в пределах дифракционных дисков $00\bar{2}$ и 002 соответственно.

Из графиков зависимостей *R*-факторов от толщины образца (рис. 5) следует, что при ориентации образца вдоль осей зон [100], [110] и [210] *R*-фактор принимал значения менее 0,5, что свидетельствует о небольших различиях в распределении интенсивностей на изображениях дифракционных дисков $00\bar{2}$ и 002. Существенные различия узоров дисков со значениями *R*-фактора более 0,6 характерны только для дифракционных картин, полученных в оси зоны [310], причем оптимальные значения толщины образца для экспериментального выявления таких различий находятся в диапазоне 60–90 нм.

Экспериментальное выявление разворота кристаллических решеток. Для получения экспериментальных дифракционных картин, соответствующих результатам моделирования, использовали тонкую фольгу образцов 1 и 2 с ориентацией поверхности вдоль направления [310]. Для устранения влияния артефактов дифракционные картины формировали от участков слоев GaAs, в которых отсутствовали антифазные домены.

Для оценки толщины приготовленных образцов экспериментальные и расчетные картины, вычисленные для разной толщины образца, сравнивали друг с другом с использованием *R*-фактора. Для такого сравнения экспериментальные дифракционные картины получали с таким же разрешением (размером пикселя), которое использовали при их моделировании. Распределение интенсивности на них нормировали так, чтобы ее среднее значение в пределах центрального дифракционного диска 000 было одинаковым на расчетных и экспериментальных картинах. В результате проведенного сравнения установили, что толщина образцов 1 и 2 составила ~ 77 и ~ 82 нм соответственно. Оба эти значения находятся в пределах диапазона толщин образцов, при которых распределения интенсивности в дифракционных дисках $00\bar{2}$ и 002 существенно отличаются друг от друга.

На рис. 6 приведены экспериментальные и расчетные дифракционные картины, полученные в сходящемся электронном пучке, для слоев GaAs над слоем Ge (рис. 6, *а*, *б*) и под ним (рис. 6, *в*, *г*) образцов 1 и 2. Для образца 1 визуальное сравнение распределений интенсивности в дисках $00\bar{2}$ и 002 (см. рис. 6, *а*, *в*) свидетельствует об отсутствии разворота кристаллических решеток слоев GaAs, расположенных над слоем Ge и под ним. К такому же заключению приводит сопоставление значений *R*-фактора, которые при сравнении экспериментальных и вычисленных без разворота решеток дифракционных картин составили $R = 0{,}35$ для верхнего и $R = 0{,}37$ для нижнего слоев GaAs. Напро-

тив, узоры образца 2 в пределах дисков $00\bar{2}$ и 002 (см. рис. 6, *а*, *в*) повернуты на 180° вокруг вертикальной прямой, проходящей через центр диска 000, что свидетельствует о развороте на 90° кристаллических решеток верхнего и нижнего слоев GaAs. С учетом такого разворота значения *R*-фактора, вычисленные при сравнении экспериментальных (см. рис. 6, *а*, *в*) и расчетных дифракционных картин (см. рис. 6, *б*, *г*), оказались равны 0,57 и 0,39 для слоев GaAs, расположенных над слоем Ge и под ним.

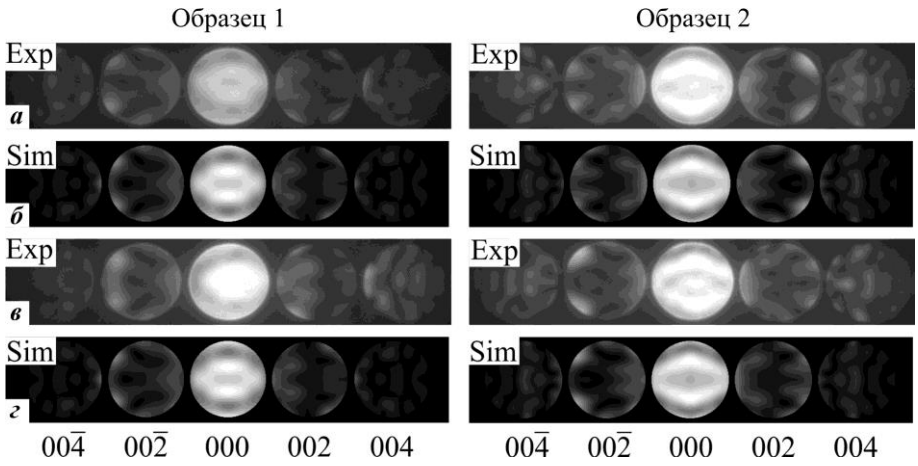


Рис. 6. Экспериментальные (*а*), (*в*) и расчетные (*б*), (*г*) дифракционные картины в сходящемся пучке образцов 1 и 2 для слоя GaAs над слоем Ge (*а*), (*б*) и под ним (*в*), (*г*)
Fig. 6. Experimental (*a*), (*c*) and simulated (*b*), (*d*) convergent beam electron diffraction patterns of samples 1 and 2 for the GaAs layer above (*a*), (*b*) and under (*c*), (*d*) the Ge layer

Таким образом, проведенное сравнение дифракционных картин слоев GaAs в структуре GaAs/Ge/GaAs экспериментально подтвердило ожидаемый разворот кристаллических решеток образца 2, который обусловлен особенностями технологии его формирования.

Заключение. Исследования методами электронной микроскопии и дифракционного анализа продемонстрировали, что в многослойных гетерокомпозициях, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, слои GaAs/Ge/GaAs имеют монокристаллическую структуру. Слой GaAs, расположенный над слоем Ge, содержит антифазные домены и дефекты упаковки. Изучение атомарной структуры одного из таких доменов методом высокоразрешающей ПРЭМ позволило установить изменение порядка в расположении атомных колонок, находящихся с разных сторон антифазной границы.

Моделирование дифракционных картин, полученных в сходящемся пучке для кристаллической решетки GaAs, показало, что ориентация образца вдоль оси зоны [310] является оптимальной для выявления различий в распределениях интенсивности на дифракционных дисках $00\bar{2}$ и 002. Такие различия в узорах на экспериментальных дифракционных картинах позволили установить, что кристаллические решетки верхнего и нижнего слоев GaAs имеют одинаковую ориентацию в одном из образцов, а в другом – они повернуты относительно друг друга на 90°. Представленный метод определения разворота кристаллических решеток в слоях GaAs является развитием подхода, предложенного в работе [35].

Литература

1. Interface-induced topological insulator transition in GaAs/Ge/GaAs quantum wells / ***D. Zhang, W. Lou, M. Miao et al.*** // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111. Iss. 15. Art. ID: 156402. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.156402

2. Quantum information memory based on reconfigurable topological insulators by piezotronic effect / ***X. Guo, G. Hu, Ya. Zhang et al.*** // Nano Energy. 2019. Vol. 60. P. 36–42. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.035

3. Terahertz-wave generation in quasi-phase-matched GaAs / ***K. L. Vodopyanov, M. M. Fejer, X. Yu et al.*** // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. Iss. 14. Art. No. 141119. https://doi.org/10.1063/1.2357551

4. ***Lu X., Kumagai M., Minami Y., Kitada T.*** Sublattice reversal in GaAs/Ge/GaAs(113)B heterostructures and its application to THz emitting devices based on a coupled multilayer cavity // Jpn. J. Appl. Phys. 2018. Vol. 57. No. 4S. Art. ID: 04FH07. https://doi.org/10.7567/JJAP.57.04FH07

5. ***Koh S., Kondo T., Shiraki Y., Ito R.*** GaAs/Ge/GaAs sublattice reversal epitaxy and its application to nonlinear optical devices // J. Cryst. Growth. 2001. Vol. 227–228. P. 183–192. https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)00660-1

6. ***Казаков И. П., Цехош В. И., Базалевский М. А., Клековкин А. В.*** Гетероструктуры GaAs/Ge/GaAs для темплейтов оптических нелинейных преобразователей с регулярной доменной структурой. I. Молекулярно-пучковая эпитаксия // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2017. Т. 44. № 7. С. 3–10. EDN: ZDDOJZ.

7. GaAs/Ge/GaAs heterostructures by molecular beam epitaxy / ***S. Strite, M. S. Ünlü, K. Adomi et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. B. 1990. Vol. 8. Iss. 5. P. 1131–1140. https://doi.org/10.1116/1.584931

8. ***Faucher J., Masuda T., Lee M. L.*** Initiation strategies for simultaneous control of antiphase domains and stacking faults in GaAs solar cells on Ge // J. Vac. Sci. Technol. B. 2016. Vol. 34. Iss. 4. Art. No. 041203. https://doi.org/10.1116/1.4945659

9. $GaAs_{1-x}Bi_x$ growth on Ge: Anti-phase domains, ordering, and exciton localization / ***T. Paulauskas, V. Pacebutas, A. Geizutis et al.*** // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. Iss. 1. Art. No. 2002. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58812-y

10. ***Dasilva Y. A. R., Kozak R., Erni R., Rossell M. D.*** Structural defects in cubic semiconductors characterized by aberration-corrected scanning transmission electron microscopy // Ultramicroscopy. 2017. Vol. 176. P. 11–22. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2016.09.015

11. Defect structures in (001) zincblende GaN/3C-SiC nucleation layers / ***P. Vacek, M. Frentrup, L. Y. Lee et al.*** // J. Appl. Phys. 2021. Vol. 129. Art. No. 155306. https://doi.org/10.1063/5.0036366

12. Advanced transmission electron microscopy investigation of defect formation in movpe-growth of gap on silicon using arsenic initial coverage / ***A. Navarro, E. Garcia-Tabares, Q. M. Ramasse et al.*** // Appl. Surf. Sci. 2023. Vol. 610. Art. ID: 155578. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155578

13. Bufferless epitaxial growth of GaAs on step-free Ge(001) mesa / ***D.-M. Huang, J.-Y. Zhang, J.-H. Wang et al.*** // Chinese Phys. Lett. 2021. Vol. 38. No. 6. Art. No. 068101. https://doi.org/10.1088/0256-307X/38/6/068101

14. Гетероструктуры GaAs/Ge/GaAs для темплейтов оптических нелинейных преобразователей с регулярной доменной структурой. II. Исследование свойств / ***И. П. Казаков, А. А. Пручкина, М. А. Базалевский и др.*** // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2017. Т. 44. № 8. С. 10–17. EDN: ZDDONB.

15. Study of sublattice inversion in GaAs/Ge/GaAs(001) crystal by X-ray diffraction / ***S. Nakatani, S. Kusano, T. Takahashi et al.*** // Appl. Surf. Sci. 2000. Vol. 159–160. P. 256–259. https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00098-2

16. Growth of strained-layer GaAs/Ge superlattices by magnetron sputtering: Optical and structural characterization / ***E. Rosendo, A. G. Rodriguez, H. Navarro-Contreras et al.*** // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. Iss. 6. P. 3209–3214. https://doi.org/10.1063/1.1347413

17. Comparison of convergent beam electron diffraction and annular bright field atomic imaging for GaN polarity determination / ***A. Roshko, M. D. Brubaker, P. T. Blanchard et al.*** // J. Mater. Res. 2017. Vol. 32. Iss. 5. P. 936–946. https://doi.org/10.1557/jmr.2016.443

18. ***Kuwano N., Kaur J., Rahmah S.*** Electron microscopy determination of crystallographic polarity of aluminum nitride thin films // Micron. 2019. Vol. 116. P. 80–83. https://doi.org/10.1016/j.micron.2018.09.014

19. Growth modes and chemical-phase separation in $GaP_{1-x}N_x$ layers grown by chemical beam epitaxy on GaP/Si(001) / ***K. Ben Saddik, S. Fernandez-Garrido, R. Volkov et al.*** // J. Appl. Phys. 2023. Vol. 134. Iss. 17. Art. No. 175703. https://doi.org/10.1063/5.0173748

20. The Peak Pairs algorithm for strain mapping from HRTEM images / ***P. L. Galindo, S. Kret, A. M. Sanchez et al.*** // Ultramicroscopy. 2007. Vol. 107. Iss. 12. P. 1186–1193. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2007.01.019

21. Исследование структуры тонкого слоя алюминия на вицинальной поверхности подложки арсенида галлия методом высокоразрешающей электронной микроскопии / ***М. В. Ловыгин, Н. И. Боргардт, М. Зайбт и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2015. Т. 20. № 1. С. 10–16. EDN: TMZZNP.

22. ***Giannuzzi L. A., Stevie F. A.*** A review of focused ion beam milling techniques for TEM specimen preparation // Micron. 1999. Vol. 30. Iss. 3. P. 197–204. https://doi.org/10.1016/S0968-4328(99)00005-0

23. ***Kakibayashi H., Nagata F., Katayama Y., Shiraki Y.*** Structure analysis of oval defect on molecular beam epitaxial GaAs layer by cross-sectional transmission electron microscopy observation // Jpn. J. Appl. Phys. 1984. Vol. 23. No. 11A. P. L846–L848. https://doi.org/10.1143/JJAP.23.L846

24. GaP-nucleation on exact Si(001) substrates for III/V device integration / ***K. Volz, A. Beyer, W. Witte et al.*** // J. Cryst. Growth. 2011. Vol. 315. Iss. 1. P. 37–47. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.10.036

25. ***Guelton N., Saint-Jacques R. G., Lalande G., Dodelet J.-P.*** Microstructural study of GaAs epitaxial layers on Ge(100) substrates // J. Mater. Res. 1995. Vol. 10. Iss. 4. P. 843–852. https://doi.org/10.1557/JMR.1995.0843

26. ***Beyer A., Volz K.*** Advanced electron microscopy for III/V on silicon integration // Adv. Mater. Interfaces. 2019. Vol. 6. Iss. 12. Art. No. 1801951. https://doi.org/10.1002/admi.201801951

27. Generation and annihilation of antiphase domain boundaries in GaAs on Si grown by molecular beam epitaxy / ***A. Georgakilas, J. Stoemenos, K. Tsagaraki et al.*** // J. Mater. Res. 1993. Vol. 8. Iss. 8. P. 1908–1921. https://doi.org/10.1557/JMR.1993.1908

28. ***Kawabe M., Ueda T.*** Self-annihilation of antiphase boundary in GaAs on Si(100) grown by molecular beam epitaxy // Jpn. J. Appl. Phys. 1987. Vol. 26. No. 6A. P. L944–L946. https://doi.org/10.1143/JJAP.26.L944

29. ***Hudait M. K., Krupanidhi S. B.*** Self-annihilation of antiphase boundaries in GaAs epilayers on Ge substrates grown by metal-organic vapor-phase epitaxy // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. Iss. 11. P. 5972–5979. https://doi.org/10.1063/1.1368870

30. Antiphase boundaries in GaAs / ***N.-H. Cho, B. C. De Cooman, C. B. Carter et al.*** // Appl. Phys. Lett. 1985. Vol. 47. Iss. 8. P. 879–881. https://doi.org/10.1063/1.95963

31. ***Stadelmann P. A.*** EMS – a software package for electron diffraction analysis and HREM image simulation in materials science // Ultramicroscopy. 1987. Vol. 21. Iss. 2. P. 131–145. https://doi.org/10.1016/0304-3991(87)90080-5

32. ***Kauffmann Y.*** HREM-DIMA (high resolution electron microscopy digital image matching analysis) // Dr. Yaron Kauffmann's Website [Электронный ресурс]. 24.05.2013. URL: https://mtyaron.com/microscopy/hrem-dima/ (дата обращения: 29.07.2024).

33. Appropriate zone-axis orientations for the determination of crystal polarity by convergent-beam electron diffraction / ***K. Tanaka, N. L. Okamoto, S. Fujio et al.*** // J. Appl. Cryst. 2015. Vol. 48. P. 736–746. https://doi.org/10.1107/S1600576715004884

34. Iterative structure retrieval techniques in HREM: A comparative study and a modular program package / ***G. Möbus, R. Schweinfest, T. Gemming et al.*** // J. Microsc. 1998. Vol. 190. Iss. 1–2. P. 109–130. https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.1998.3120865.x

35. Разворот слоев GaAs в гетероструктурах GaAs/Ge/GaAs / ***И. П. Казаков, С. А. Зиновьев, А. В. Клековкин и др.*** // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2020. Т. 47. № 12. С. 3–10. EDN: OQKGMH.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 05.06.2024 г.;
принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Сазонов Вадим Андреевич – инженер Научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vadim_sazonov_92@mail.ru

Боргардт Николай Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики и прикладной математики, начальник Научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Национального иссле-

довательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), borgardt@miee.ru

Приходько Александр Сергеевич – 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), a.s.prikhodko@org.miet.ru

Казаков Игорь Петрович – доктор физико-математических наук, и. о. заведующего лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53), kazakov@sci.lebedev.ru

Клековкин Алексей Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории новых материалов для ИК фотоники Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53), klekovkinav@lebedev.ru

References

1. Zhang D., Lou W., Miao M., Zhang S.-C., Chang K. Interface-induced topological insulator transition in GaAs/Ge/GaAs quantum wells. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 111, iss. 15, art. ID: 156402. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.156402

2. Guo X., Hu G., Zhang Ya., Liu R., Dan M., Li L., Zhang Y. Quantum information memory based on reconfigurable topological insulators by piezotronic effect. *Nano Energy*, 2019, vol. 60, pp. 36–42. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.035

3. Vodopyanov K. L., Fejer M. M., Yu X., Harris J. S., Lee Y.-S., Hurlbut W. C., Kozlov V. G. et al. Terahertz-wave generation in quasi-phase-matched GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, iss. 14, art. no. 141119. https://doi.org/10.1063/1.2357551

4. Lu X., Kumagai M., Minami Y., Kitada T. Sublattice reversal in GaAs/Ge/GaAs(113)B heterostructures and its application to THz emitting devices based on a coupled multilayer cavity. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2018, vol. 57, no. 4S, art. ID: 04FH07. https://doi.org/10.7567/JJAP.57.04FH07

5. Koh S., Kondo T., Shiraki Y., Ito R. GaAs/Ge/GaAs sublattice reversal epitaxy and its application to nonlinear optical devices. *J. Cryst. Growth*, 2001, vol. 227–228, pp. 183–192. https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)00660-1

6. Kazakov I. P., Tsekhosh V. I., Bazalevsky M. A., Klekovkin A. V. Orientation-patterned templates GaAs/Ge/GaAs for nonlinear optical devices. I. Molecular beam epitaxy. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2017, vol. 44, iss. 7, pp. 187–191. https://doi.org/10.3103/S1068335617070016

7. Strite S., Ünlü M. S., Adomi K., Gao G.-B., Agarwal A., Rockett A., Morkoç H., Li D. et al. GaAs/Ge/GaAs heterostructures by molecular beam epitaxy. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1990, vol. 8, iss. 5, pp. 1131–1140. https://doi.org/10.1116/1.584931

8. Faucher J., Masuda T., Lee M. L. Initiation strategies for simultaneous control of antiphase domains and stacking faults in GaAs solar cells on Ge. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2016, vol. 34, iss. 4, art. no. 041203. https://doi.org/10.1116/1.4945659

9. Paulauskas T., Pacebutas V., Geizutis A., Stanionyte S., Dudutiene E., Skapas M., Naujokaitis A., Strazdiene V. et al. $GaAs_{1-x}Bi_x$ growth on Ge: Anti-phase domains, ordering, and exciton localization. *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, iss. 1, art. no. 2002. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58812-y

10. Dasilva Y. A. R., Kozak R., Erni R., Rossell M. D. Structural defects in cubic semiconductors characterized by aberration-corrected scanning transmission electron microscopy. *Ultramicroscopy*, 2017, vol. 176, pp. 11–22. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2016.09.015

11. Vacek P., Frentrup M., Lee L. Y., Massabuau F. C.-P., Kappers M. J., Wallis D. J., Gröger R., Oliver R. A. Defect structures in (001) zincblende GaN/3C-SiC nucleation layers. *J. Appl. Phys.*, 2021, vol. 129, art. no. 155306. https://doi.org/10.1063/5.0036366

12. Navarro A., Garcia-Tabares E., Ramasse Q. M., Caño P., Rey-Stolle I., Galiana B. Advanced transmission electron microscopy investigation of defect formation in movpe-growth of gap on silicon using arsenic initial coverage. *Appl. Surf. Sci.*, 2023, vol. 610, art. ID: 155578. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155578

13. Huang D.-M., Zhang J.-Y., Wang J.-H., Wei W.-Q., Wang Z.-H., Wang T., Zhang J.-J. Bufferless epitaxial growth of GaAs on step-free Ge(001) mesa. *Chinese Phys. Lett.*, 2021, vol. 38, iss. 6, art. no. 068101. https://doi.org/10.1088/0256-307X/38/6/068101

14. Kazakov I. P., Pruchkina A. A., Bazalevsky M. A., Klekovkin A. V., Tsekhosh V. I. Orientation-patterned templates GaAs/Ge/GaAs for nonlinear optical devices. II. Investigation of properties. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2017, vol. 44, iss. 8, pp. 223–227. https://doi.org/10.3103/S1068335617080024

15. Nakatani S., Kusano S., Takahashi T., Hirano K., Koh S., Kondo T., Ito R. Study of sublattice inversion in GaAs/Ge/GaAs(001) crystal by X-ray diffraction. *Appl. Surf. Sci.*, 2000, vol. 159–160, pp. 256–259. https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00098-2

16. Rosendo E., Rodriguez A. G., Navarro-Contreras H., Vidal M. A., Asomoza R., Kudriavtsev Y. Growth of strained-layer GaAs/Ge superlattices by magnetron sputtering: Optical and structural characterization. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 89, iss. 6, pp. 3209–3214. https://doi.org/10.1063/1.1347413

17. Roshko A., Brubaker M. D., Blanchard P. T., Bertness K. A., Harvey T. E., Geiss R. H., Levin I. Comparison of convergent beam electron diffraction and annular bright field atomic imaging for GaN polarity determination. *J. Mater. Res.*, 2017, vol. 32, iss. 5, pp. 936–946. https://doi.org/10.1557/jmr.2016.443

18. Kuwano N., Kaur J., Rahmah S. Electron microscopy determination of crystallographic polarity of aluminum nitride thin films. *Micron*, 2019, vol. 116, pp. 80–83. https://doi.org/10.1016/j.micron.2018.09.014

19. Ben Saddik K., Fernandez-Garrido S., Volkov R., Grandal J., Borgardt N., Garcia B. J. Growth modes and chemical-phase separation in $GaP_{1-x}N_x$ layers grown by chemical beam epitaxy on GaP/Si(001). *J. Appl. Phys.*, 2023, vol. 134, art. no. 175703. https://doi.org/10.1063/5.0173748

20. Galindo P. L., Kret S., Sanchez A. M., Laval J.-Y. Yañez A., Pizarro J., Guerrero E. et al. The Peak Pairs algorithm for strain mapping from HRTEM images. *Ultramicroscopy*, 2007, vol. 107, iss. 12, pp. 1186–1193. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2007.01.019

21. Lovygin M. V., Borgardt N. I., Seibt M., Kazakov I. P., Tsikunov A. V. Study of the structure of a thin aluminum layer on the vicinal surface of gallium arsenide substrate by high-resolution electron microscopy. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, iss. 13, pp. 1714–1717. https://doi.org/10.1134/S1063782615130102

22. Giannuzzi L. A., Stevie F. A. A review of focused ion beam milling techniques for TEM specimen preparation. *Micron*, 1999, vol. 30, iss. 3, pp. 197–204. https://doi.org/10.1016/S0968-4328(99)00005-0

23. Kakibayashi H., Nagata F., Katayama Y., Shiraki Y. Structure analysis of oval defect on molecular beam epitaxial GaAs layer by cross-sectional transmission electron microscopy observation. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1984, vol. 23, no. 11A, pp. L846–L848. https://doi.org/10.1143/JJAP.23.L846

24. Volz K., Beyer A., Witte W., Ohlmann J., Nemeth I., Kunert B., Stolz W. GaP-nucleation on exact Si(001) substrates for III/V device integration. *J. Cryst. Growth*, 2011, vol. 315, iss. 1, pp. 37–47. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.10.036

25. Guelton N., Saint-Jacques R. G., Lalande G., Dodelet J.-P. Microstructural study of GaAs epitaxial layers on Ge(100) substrates. *J. Mater. Res.*, 1995, vol. 10, iss. 4, pp. 843–852. https://doi.org/10.1557/JMR.1995.0843

26. Beyer A., Volz K. Advanced electron microscopy for III/V on silicon integration. *Adv. Mater. Interfaces*, 2019, vol. 6, iss. 12, art. no. 1801951. https://doi.org/10.1002/admi.201801951

27. Georgakilas A., Stoemenos J., Tsagaraki K., Komninou Ph., Flevaris N., Panayotatos P., Christou A. Generation and annihilation of antiphase domain boundaries in GaAs on Si grown by molecular beam epitaxy. *J. Mater. Res.*, 1993, vol. 8, iss. 8, pp. 1908–1921. https://doi.org/10.1557/JMR.1993.1908

28. Kawabe M., Ueda T. Self-annihilation of antiphase boundary in GaAs on Si(100) grown by molecular beam epitaxy. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1987, vol. 26, no. 6A, pp. L944–L946. https://doi.org/10.1143/JJAP.26.L944

29. Hudait M. K., Krupanidhi S. B. Self-annihilation of antiphase boundaries in GaAs epilayers on Ge substrates grown by metal-organic vapor-phase epitaxy. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 89, iss. 11, pp. 5972–5979. https://doi.org/10.1063/1.1368870

30. Cho N.-H., De Cooman B. C., Carter C. B., Fletcher R., Wagner D. K. Antiphase boundaries in GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, vol. 47, iss. 8, pp. 879–881. https://doi.org/10.1063/1.95963

31. Stadelmann P. A. EMS – a software package for electron diffraction analysis and HREM image simulation in materials science. *Ultramicroscopy*, 1987, vol. 21, iss. 2, pp. 131–145. https://doi.org/10.1016/0304-3991(87)90080-5

32. Kauffmann Y. HREM-DIMA (high resolution electron microscopy digital image matching analysis). *Dr. Yaron Kauffmann's Website.* 24.05.2013. Available at: https://mtyaron.com/microscopy/hrem-dima/ (accessed: 29.07.2024).

33. Tanaka K., Okamoto N. L., Fujio S., Sakamoto H., Inui H. Appropriate zone-axis orientations for the determination of crystal polarity by convergent-beam electron diffraction. *J. Appl. Cryst.*, 2015, vol. 48, pp. 736–746. https://doi.org/10.1107/S1600576715004884

34. Möbus G., Schweinfest R., Gemming T., Wagner T., Rühle M. Iterative structure retrieval techniques in HREM: A comparative study and a modular program package. *J. Microsc.*, 1998, vol. 190, iss. 1–2, pp. 109–130. https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.1998.3120865.x

35. Kazakov I. P., Zinov'ev S. A., Klekovkin A. V., Sazonov V. A., Kukin V. N., Borgardt N. I. Extended defects in GaAs/Ge/GaAs heterostructures with turning GaAs layers. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2020, vol. 47, iss. 12, pp. 365–370. https://doi.org/10.3103/S106833562012012X

The article was submitted 13.05.2024; approved after reviewing 05.06.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Vadim A. Sazonov – Engineer of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vadim_sazonov_92@mail.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

Alexander S. Prikhodko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), a.s.prikhodko@org.miet.ru

Igor P. Kazakov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acting Head of the Laboratory of Molecular Beam Epitaxy, P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky ave., 53), kazakov@sci.lebedev.ru

Alexey V. Klekovkin – Junior Scientific Researcher of the Laboratory of New Materials for IR Photonics, P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky ave., 53), klekovkinav@lebedev.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 – 2023 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 538.93
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-575-584
EDN: AJWYFI

Влияние инжекции электронов и температуры на газовую чувствительность алмазографитовых пленочных структур к парам воды

А. В. Скрипаль[1], Н. А. Трунилин[1], Р. К. Яфаров[1,2]

[1]Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия
[2]Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук, г. Саратов, Россия

skripala_v@sgu.ru

Аннотация. Газовые сенсоры, созданные на основе широкозонных металлооксидных материалов (включая диоксид олова), позволяют детектировать широкий спектр газов органической и неорганической природы. Однако число материалов, которые используются для их получения, ограниченно, и они экологически небезвредены. Для развития «зеленых» полупроводниковых технологий значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения представляет создание новых материалов и структур с газочувствительными свойствами, а также конкурентоспособных методов их получения. В работе исследованы возможности использования в качестве газочувствительных материалов алмазографитовых пленочных структур, полученных в плазме микроволнового газового разряда паров этанола. Проведены исследования закономерностей влияния напряжения инжекции электронов, температуры и влажности воздуха на ВАХ и удельные поверхностные сопротивления алмазографитовых пленочных структур. Показано, что выявленные закономерности могут быть описаны с использованием теории токов, ограниченных пространственным зарядом в некристаллических структурах с ловушками захвата. Установлено существование у края разрешенной зоны электронной структуры используемого материала полосы с повышенной плотностью локализованных электронных состояний с энергией около 0,032 эВ, которая определяет характер зависимостей удельного поверхностного сопротивления сенсорной структуры от параметров детектирования газовой среды. Показана высокая эффективность использования алмазографитовых пленочных структур для детектирования паров воды в

© А. В. Скрипаль, Н. А. Трунилин, Р. К. Яфаров, 2024

виде более чем трехкратного уменьшения их удельных поверхностных сопротивлений по сравнению с отсутствием паров воды в атмосфере.

Ключевые слова: микроволновая плазма, алмазографитовые пленки, газовые сенсоры, электронная структура, ловушки захвата, пары воды, инжекция электронов, электропроводность

Для цитирования: Скрипаль А. В., Трунилин Н. А., Яфаров Р. К. Влияние инжекции электронов и температуры на газовую чувствительность алмазографитовых пленочных структур к парам воды // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 575–584. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-575-584. – EDN: AJWYFI.

Original article

Effect of electron injection and temperature on the gas sensitivity to water vapor of diamond-graphite film structures

A. V. Skripal[1], N. A. Trunilin[1], R. K. Yafarov[1,2]

[1]Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russia
[2]Saratov branch of the V. A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

skripala_v@sgu.ru

Abstract. Gas sensors created on the basis of wide-gap metal oxide materials (including tin dioxide) make it possible to detect a wide range of gases of organic and inorganic nature. However, the range of materials used to produce them is limited and they are environmentally unsafe. In the development of green semiconductor technologies, the use of new materials and competitive methods for obtaining structures with gas-sensitive properties is of important fundamental and applied interest. In this work, the possibilities of using diamond-graphite film structures obtained in the plasma of a microwave gas discharge of ethanol vapor as gas-sensitive materials are studied. Studies have been carried out on the patterns of electron injection voltage, temperature and air humidity effect on the volt-ampere characteristics and specific surface resistance of diamond-graphite film structures. It was shown that the revealed patterns can be described using the theory of currents limited by space charge in non-crystalline structures with capture traps. It has been established that at the edge of the allowed zone of the electronic structure of the material used there is a band with an increased density of localized electronic states with an energy of about 0.032 eV, which determines the nature of the dependences of the specific surface resistance of the sensor structure on the detection parameters of the gaseous medium. The high efficiency of using diamond-graphite film structures for detecting water vapor has been shown in the form of a more than threefold decrease in their specific surface resistance compared to the absence of water vapor in the atmosphere.

Keywords: microwave plasma, diamond-graphite films, gas sensors, electronic structure, capture traps, water vapor, electron injection, electrical conductivity

For citation: Skripal A. V., Trunilin N. A., Yafarov R. K. Effect of electron injection and temperature on the gas sensitivity to water vapor of diamond-graphite film structures. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 575–584. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-575-584. – EDN: AJWYFI.

Введение. Наиболее важными особенностями использования алмазографитовых пленочных структур в качестве сенсоров в отличие от металлооксидных материалов (включая диоксид олова) являются их экологическая чистота, высокая газочувствительность в широком диапазоне режимов детектирования, простота и дешевизна их получения с применением современного технологического оборудования микроэлектроники. Высокая газовая чувствительность алмазографитовых сенсоров при низких (комнатных) температурах определяется не только высокоразвитой морфологией поверхности, но и возможностью получения углеродных пленочных структур с различными соотношениями алмазной и графитовой фаз и адсорбционной способностью к различным неорганическим и органическим газовым средам как при качественном, так и, возможно, количественном анализе. Это позволит использовать углеродные структуры не только для создания систем анализа состава окружающей среды в различных технологических комплексах промышленного назначения, но и в медицине, например, в качестве автономных газовых сенсоров при детектировании летучих соединений в выдыхаемом воздухе человека, которые являются продуктами процессов метаболизма при заболеваниях, а также в тренировочных процессах спортсменов.

В настоящее время созданы системы детектирования многокомпонентных газовых смесей и запахов, содержащие полупроводниковые сенсоры, устройства предварительной обработки сигналов, контроля и управления рабочим режимом технологических комплексов, которые сформированы с использованием высоких технологий микро- и наноэлектроники [1–4].

Цель настоящей работы – исследование механизма чувствительности сенсоров на основе алмазографитовых пленочных структур к парам воды в широком диапазоне режимов детектирования.

Методика эксперимента. Алмазографитовые пленочные структуры получали с использованием микроволнового газового разряда паров этанола на частоте 2,45 ГГц по методике, изложенной в работе [5]. Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля составляли соответственно 250 Вт и 875 Гс. Магнитное поле обеспечивало выполнение условий электронного циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5 %. Высокая степень ионизации и возможность управления распределением электронов по энергиям от 5–10 до 90–100 эВ являются важным преимуществом микроволновой плазмы по сравнению с плазмой других электрических газовых разрядов. Это позволяет селективно активировать состав углеродосодержащего плазмообразующего газа и создавать условия для получения углеродных структур с различными типами химических связей.

Пленки осаждали на поликоровые подложки, толщина которых составляла около 100 нм. Процесс проводили в условиях слабой адсорбции при $T = 300$ °C и давлении паров этанола около 0,05 Па. Пленочные структуры исследовали зондовыми методами атомно-силовой и электронной микроскопии, а также методами рентгеноструктурного анализа и комбинационного рассеяния света (КРС). Полученные композиционные пленочные покрытия представляют собой графитовую матрицу с включениями алмазных

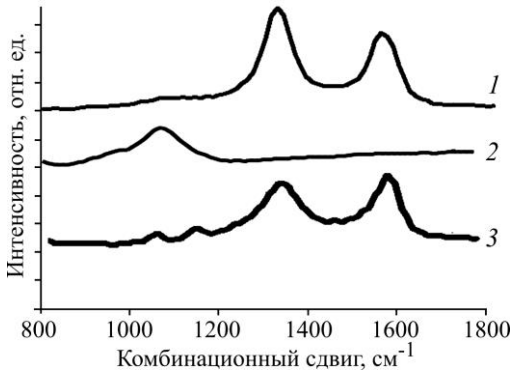


Рис. 1. КРС-спектры алмазографитовых (*1*), нанокристаллических алмазных (*2*) и графитоподобных (*3*) пленок

Fig. 1. Raman spectra of diamond-graphite (*1*), nanocrystalline diamond (*2*) and graphite-like (*3*) films

нанокристаллитов с размерами от 5–10 до 100 нм и поверхностной плотностью до 10^8 см$^{-2}$. Рентгеноструктурные исследования показали присутствие в пленках включений мелкокристаллической фазы графита (002), алмазоподобной фазы кубической ориентации (111) и гексагональных решеток различных структурных модификаций (лонсдейлит, C(20H) и др.). Результаты рентгеноструктурного анализа подтверждены данными, полученными методом КРС. Для рассматриваемых структур характерен ярко выраженный двухпиковый спектр: пик в области 1330 см$^{-1}$, свидетельствующий о наличии алмазной фазы, и пик в области 1580 см$^{-1}$, указывающий на присутствие как кристаллического, так и аморфизованного графита (рис. 1).

Подключение пленочных структур к источнику питания при исследованиях ВАХ осуществляли через осажденные термическим испарением в вакууме никелевые контактные площадки. Измерения проводили в интервале температур от комнатной до 350 °C с использованием источника питания GW Instek PSP-603. Напряжение изменяли в диапазоне 0–60 В с шагом 1 В. Размер области углеродной структуры (рис. 2, *а*), на которой в экспериментах осуществляли контакт с сухим и влажным воздухом, составлял 2 × 10 мм (рис. 2, *б*). Эти параметры контактной области использовали для расчета удельного поверхностного сопротивления ρ газочувствительной структуры.

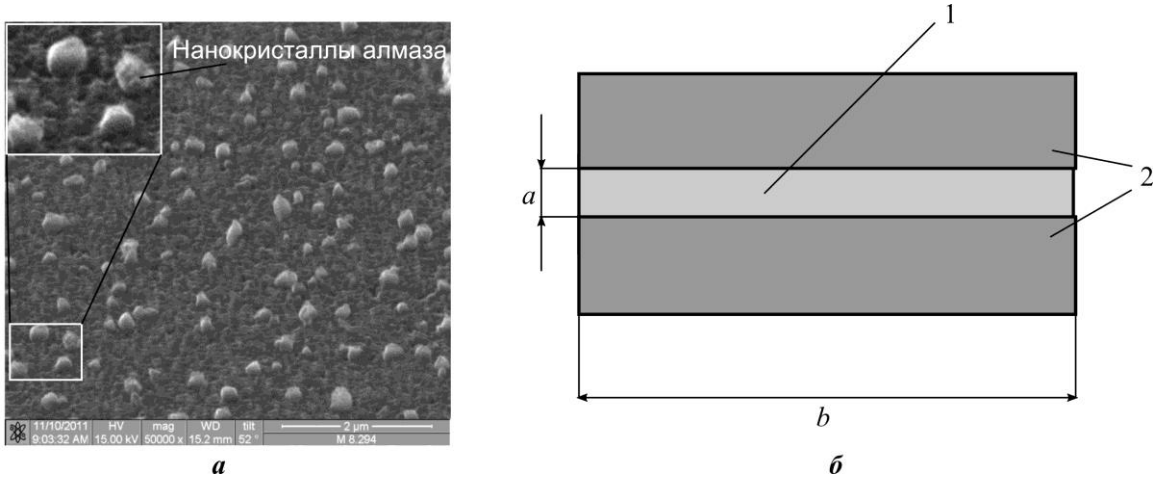


Рис. 2. СЭМ-изображение фрагмента алмазографитовой пленки (*а*) и схематическое изображение (вид сверху) газочувствительной структуры (*б*): 1 – алмазографитовая пленка; 2 – никелевые контактные площадки

Fig. 2. SEM image of a fragment of diamond-graphite film (*a*) and schematic representation (top view) of the gas-sensitive structure (*b*): 1 – diamond-graphite film; 2 – nickel contact pads

На рис. 3–5 приведены ВАХ, зависимости сопротивления области контакта с внешней средой от напряжения между электродами и температуры в сухом и влажном воздухе, а также построенные на их основе зависимости от температуры откликов сенсорного материала к парам воды, рассчитанные по формуле

$$S = \frac{\rho_с - \rho_в}{\rho_в} 100\ \%,$$

где $\rho_с$ – сопротивление материала в сухом воздухе; $\rho_в$ – сопротивление материала в парах воды.

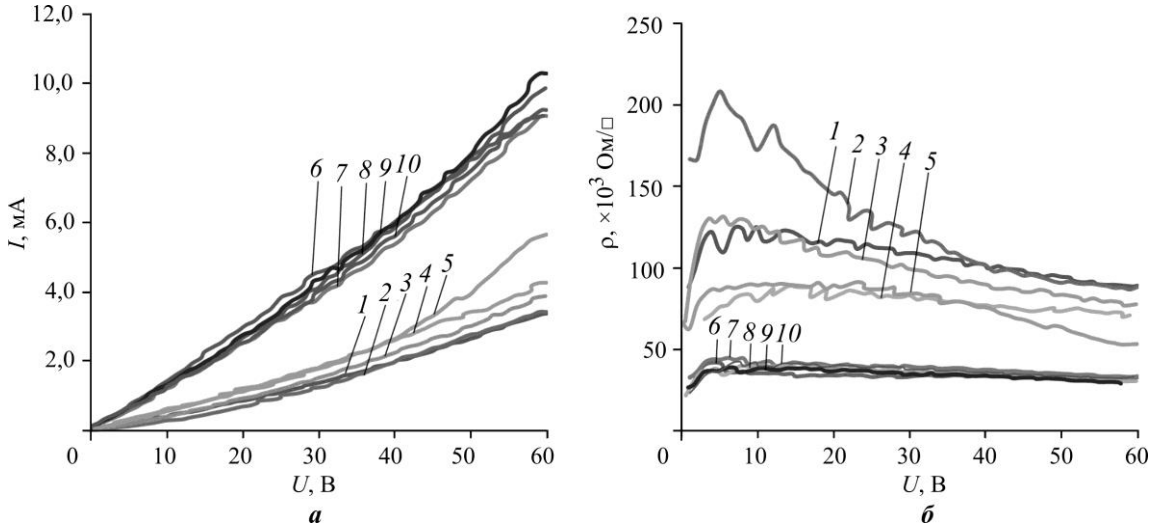


Рис. 3. Зависимости тока (*а*) и удельного поверхностного сопротивления (*б*) от напряжения инжекции, полученные в сухом (кривые *1–5*) и влажном (кривые *6–10*) воздухе, при различных температурах *T*, °С: *1*, *6* – 30; *2*, *7* – 80; *3*, *8* – 170; *4*, *9* – 250; *5*, *10* – 350

Fig. 3. Dependences of current (*a*) and specific surface resistance (*b*) on injection voltage obtained in dry (curves *1–5*) and humid (curves *6–10*) air at different temperatures *T*, °C: *1*, *6* – 30; *2*, *7* – 80; *3*, *8* – 170; *4*, *9* – 250; *5*, *10* – 350

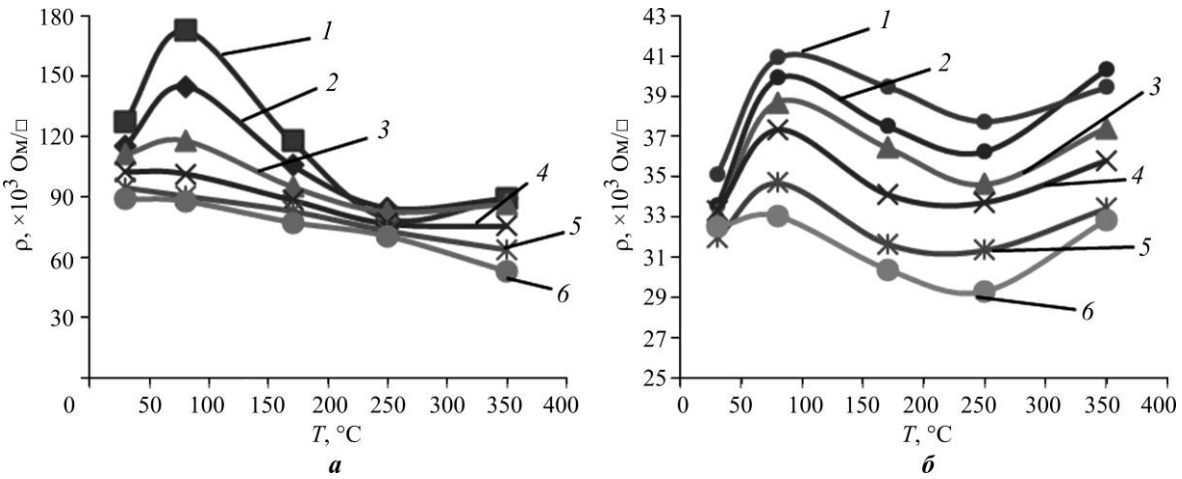


Рис. 4. Зависимости удельного поверхностного сопротивления от температуры, полученные в сухом (*а*) и влажном (*б*) воздухе, при различных напряжениях инжекции *U*, В: *1* – 10; *2* – 20; *3* – 30; *4* – 40; *5* – 50; *6* – 60

Fig. 4. Dependences of specific surface resistance on temperature obtained in dry (*a*) and humid (*b*) air at different injection voltages *U*, V: *1* – 10; *2* – 20; *3* – 30; *4* – 40; *5* – 50; *6* – 60

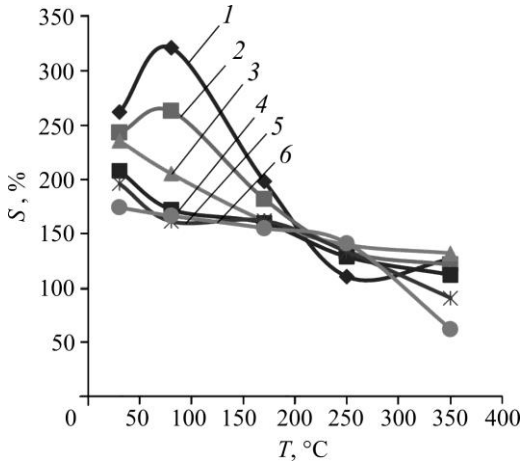


Рис. 5. Зависимость отклика алмазографитовой пленочной структуры к парам воды от температуры детектирования при различных напряжениях инжекции *U*, В: *1* – 10; *2* – 20; *3* – 30; *4* – 40; *5* – 50; *6* – 60

Fig. 5. Dependence of the response of the diamond-graphite film structure to water vapor on the detection temperature at various injection voltages *U*, V: *1* – 10; *2* – 20; *3* – 30; *4* – 40; *5* – 50; *6* – 60

Можно видеть, что при измерениях ВАХ во влажном воздухе токи существенно больше и разности между ними и токами при измерениях в сухом воздухе с повышением напряжения увеличиваются. Зависимости удельных поверхностных сопротивлений от напряжений и температуры имеют нелинейный характер. Значение и крутизна максимумов зависимостей сопротивления от температуры при $T = 80$ °С тем больше, чем меньше напряжения инжекции. В сухом воздухе при $U > 40$ В сопротивление не имеет экстремумов и линейно уменьшается с ростом температуры (см. рис. 4). Характер зависимости чувствительности алмазографитового сенсора к парам воды от температуры аналогичен характеру изменения сопротивления от температуры для сухого воздуха (см. рис. 5).

Результаты и их обсуждение. Анализ изменений ВАХ и удельных поверхностных сопротивлений углеродных пленочных структур в сухом и влажном воздухе (см. рис. 3 и 4) в зависимости от напряжения между электродами и температуры показывает, что они могут быть описаны с использованием основных положений теории токов, ограниченных пространственным зарядом, в некристаллических структурах с ловушками захвата [6]. При нормальной относительной влажности воздуха и комнатной температуре при изменении напряжения от 0 до 3–5 В в области слабых токов, которые определяются собственной проводимостью структуры, большая часть инжектированных электронов захватывается ловушками дефектов микроструктуры пленки. Вследствие этого ток с увеличением напряжений растет медленнее, чем по закону Ома, что трактуется как рост удельных поверхностных сопротивлений (рис. 3, *а*). При увеличении напряжений от 3–5 до 20 В в результате повышения концентрации захваченных ловушками электронов увеличивается пространственный заряд, индуцированное электрическое поле которого препятствует полевому дрейфу. Концентрация равновесных электронов при этом остается неизменной и ток с увеличением напряжения изменяется по закону Ома с постоянным сопротивлением, которое тем меньше, чем больше напряжение инжекции (рис. 4, *а*). На участке полного заполнения ловушек (ПЗЛ) в интервале напряжений 20–60 В концентрация дрейфующих электронов увеличивается с напряжением, что эквивалентно уменьшению сопротивления. После того как ток достигнет значения, соответствующего квадратичному закону Мотта, дальнейшее его изменение в зависимости от приложенного напряжения вновь описывается законом Ома с большей электропроводностью, которая обусловлена более высокой и практически постоянной по объему концентрацией электронов.

При росте температуры до $T = 80$ °С увеличиваются равновесная концентрация, тепловая скорость и энергия электронов. Вследствие этого при одинаковой напряженности внешнего поля ускоряется по сравнению с $T = 30$ °С заполнение ловушек и сокращается интервал напряжений участка ПЗЛ. Возникновение крутого участка увели-

чения тока эквивалентно, согласно закону Ома, аналогичному по крутизне уменьшению
сопротивления. Как и в предыдущем случае, после достижения током значения, соответствующего квадратичному закону, при дальнейшем увеличении напряжения он описывается законом Ома с более низким сопротивлением, близким по значению к сопротивлению при T = 30 °C. В области слабых токов при T = 80 °C сопротивление больше, чем при T = 30 °C в 1,5 раза. С увеличением напряженности поля инжекции экстремумы сопротивления уменьшаются и при напряженности около 0,025 В/мкм они с ростом температуры во всем диапазоне ее изменения линейно уменьшаются. Согласно теории токов, ограниченных пространственным зарядом, это свидетельствует о том, что пролетное время электронов между электродами становится меньше максвелловского времени релаксации.

При $T \geq 170$ °C одновременно с тепловой энергией увеличиваются скорости теплового опустошения ловушек, время жизни инжектированных электронов и равновесные концентрации. При T = 170 °C по сравнению с T = 80 °C это уменьшает сопротивление в области слабых токов и сопротивление, при котором начинается участок ПЗЛ. Тепловой выброс электронов из ловушек замедляет переход к квадратичному закону изменения тока и его зависимости от напряжения по закону Ома с постоянным сопротивлением. Резкое, практически двукратное, уменьшение сопротивления в области слабых токов, которое возвращается к его значению при T = 30 °C, кроме названных факторов, вероятнее всего, обусловлено существованием у края разрешенной зоны полосы с высокой плотностью локализованных электронных состояний. Их заполнение происходит при кинетической энергии электронов, которая при T = 80 °C составляет около 0,032 эВ. Возникающий при этом пространственный заряд препятствует дрейфу электронов и резко увеличивает сопротивление. Его уменьшение при T = 170 °C свидетельствует о том, что полоса локализованных состояний распространяется в запрещенную зону на глубину, которая не превышает энергию электронов при этой температуре, составляющую около 0,039 эВ. Это с хорошей точностью соответствует минимуму коэффициента отражения при k = 2400 см$^{-1}$, полученного из спектральной зависимости коэффициента отражения алмазографитовой пленочной структуры в инфракрасной области с использованием спектрофотометра IRAffinity-1 (Shimadzu, Япония) с преобразованием Фурье [7].

При $T \geq 250$ °C повышение равновесной концентрации и тепловой десорбции электронов уменьшает максвелловское время релаксации. В результате уменьшаются значения и интервалы изменения сопротивления в режиме слабых токов, увеличиваются интервалы напряжений для полного заполнения ловушек захвата. После полного их заполнения при напряженности поля между электродами около 0,01 В/мкм концентрация электронов проводимости начинает увеличиваться, что сопровождается ускорением роста тока и снижением сопротивления. При T = 350 °C по сравнению с T = 250 °C при меньшем напряжении достигается стационарный участок сопротивления, при котором все инжектированные электроны идут на заполнение ловушек захвата. При напряженности поля около 0,015 В/мкм возникает участок ПЗЛ, после которого вследствие лучшей проводимости ток начинает увеличиваться быстрее, чем при T = 250 °C. При напряженности поля около 0,03 В/мкм достигается квадратичный закон изменения тока и снижение сопротивления прекращается с выходом на стационарный уровень при более высокой электропроводности.

Снижение влияния ловушек захвата на транспорт дрейфующих электронов с увеличением напряженности поля (см. рис. 4) обусловлено совокупным воздействием рассмотренных факторов, основными среди них являются:

– увеличение с температурой концентрации равновесных носителей заряда при неизменной концентрации ловушек захвата;

– увеличение с ростом температуры и напряжения инжекции времени жизни носителей заряда. При низких температурах и напряжениях инжекции реализуются большие времена максвелловской релаксации, низкие времена жизни носителей и максимумы на зависимостях сопротивления от температуры. Сопротивление в максимуме тем больше, чем меньше напряженность поля инжекции;

– уменьшение с увеличением напряженности поля пролетного времени электронов между электродами. Этот фактор является определяющим в случаях, когда пролетное время становится меньше максвелловского времени релаксации. Вследствие этого при напряженностях поля более 0,02 В/мкм зависимость сопротивления от температуры не имеет экстремумов и линейно уменьшается с ее увеличением.

Как известно, кроме пространственного заряда электронов в ловушках захвата объема пленочной структуры большое влияние на поверхностную электропроводность оказывает адсорбция атомов окружающей среды [6, 8]. В зависимости от степени сродства к электрону адсорбция посторонних для пленки атомов приводит к появлению локализованных на поверхности состояний донорного или акцепторного типа, что выражается в перераспределении подвижных носителей в приповерхностной области и изменении ее удельной электропроводимости. При контакте алмазографитовой пленочной структуры с кислородом воздушной атмосферы на ее поверхности реализуется сильная хемосорбция, при которой ионы кислорода прочно удерживают около себя свободные электроны кристаллической решетки [9]. Бомбардировка такой поверхности молекулами воды приводит к их диссоциации на гидроксильную группу OH^- и протон H^+, который захватывается ранее хемосорбированным ионом кислорода с образованием нейтральной группы OH. Это снижает поверхностную плотность отрицательного заряда атомов кислорода, уменьшает ширину области пространственного заряда на поверхности пленки и ее удельное поверхностное сопротивление [10].

При комнатной температуре, так же как при измерениях в сухом воздухе, с увеличением напряжения инжекции преодолевается поле пространственного заряда ловушек захвата, увеличивается концентрация электронов в углеродной матрице и уменьшается максвелловское время релаксации. Результат этих процессов – уменьшение сопротивления с увеличением напряжения. Изменения сопротивления в сухом и влажном воздухе, несмотря на их различие в десятки раз, при увеличении температуры в интервале 30–250 °C имеют практически одинаковый характер, который обусловлен наличием полосы локализованных электронных состояний в некристаллической углеродной пленке. Различие состоит лишь в том, что при измерениях во влажном воздухе в связи с уменьшением приповерхностной области пространственного заряда за счет нейтрализации отрицательного заряда ионов кислорода с увеличением температуры снижается эффективность влияния напряженности внешнего поля. Результатом этого является практически параллельный ход зависимостей сопротивления при увеличении температуры от 80 до 250 °C. При $T \geq 250$ °C фактором снижения влияния напряженности поля на сопротивление при измерениях в парах воды является десорбция водорода и радикалов OH^-. Уменьшение их плотности снижает суммарную концентрацию электронов в приповерхностной области алмазографитовой пленочной структуры, и сопротивление с ростом температуры увеличивается (рис. 4, *б*).

Заключение. Установленные закономерности влияния напряжения инжекции электронов, температуры и влажности воздуха на ВАХ и удельные поверхностные сопротивления алмазографитовых пленочных структур позволяют не только определить их электронную структуру и механизмы детектирования газовых сред, но и оптимизировать параметры режимов их детектирования при различных условиях эксплуатации.

Литература

1. ***Chizhov A., Rumyantseva M., Gaskov A.*** Light activation of nanocrystalline metal oxides for gas sensing: Principles, achievements, challenges // Nanomaterials. 2021. Vol. 11. Iss. 4. Art. No. 892. https://doi.org/10.3390/nano11040892

2. ***Marikutsa A., Rumyantseva M., Konstantinova E. A., Gaskov A.*** The key role of active sites in the development of selective metal oxide sensor materials // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 7. Art. No. 2554. https://doi.org/10.3390/s21072554

3. Semiconductor gas sensors / eds ***R. Jaaniso, O. K. Tan.*** Cambridge: Woodhead Publ., 2013. 576 p.

4. Sensors and microsystems: proceedings of the 17th National conf. (Brescia, Italy, Feb. 5–7, 2013) / eds ***C. Di Natale, V. Ferrari, A. Ponzoni et al.*** Cham: Springer, 2014. XIII, 478 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00684-0

5. ***Яфаров Р. К.*** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.

6. ***Ламперт М., Марк П.*** Инжекционные токи в твердых телах / пер. с англ. А. И. Розенталя, Л. Г. Парицкого. М.: Мир, 1973. 416 с.

7. ***Yafarov R. K., Shabunin N. O.*** Contact transport and field emission properties of low-dimensional 2D carbon heterostructures // Russ. Microelectron. 2022. Vol. 51. No. 6. P. 439–443. https://doi.org/10.1134/S106373972270007X

8. Введение в физику поверхности / ***К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин и др.*** М.: Наука, 2006. 490 с.

9. ***Волькенштейн Ф. Ф.*** Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции. М.: Наука, 1987. 432 с.

10. ***Гаман В. И.*** Физика полупроводниковых газовых сенсоров. Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2012. 110 с.

Статья поступила в редакцию 19.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 27.05.2024 г.; принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Скрипаль Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), skripala_v@sgu.ru

Трунилин Никита Андреевич – студент Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), hjkrryh5@gmail.com

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, профессор кафедры физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), главный научный сотрудник лаборатории субмикронной электронно-ионной технологии Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38), pirpc@yandex.ru

References

1. Chizhov A., Rumyantseva M., Gaskov A. Light activation of nanocrystalline metal oxides for gas sensing: Principles, achievements, challenges. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, iss. 4, art. no. 892. https://doi.org/10.3390/nano11040892

2. Marikutsa A., Rumyantseva M., Konstantinova E. A., Gaskov A. The key role of active sites in the development of selective metal oxide sensor materials. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 7, art. no. 2554. https://doi.org/10.3390/s21072554

3. Jaaniso R., Tan O. K., eds. *Semiconductor gas sensors*. Cambridge, Woodhead Publ., 2013. 576 p.

4. Di Natale C., Ferrari V., Ponzoni A., Sberveglieri G., Ferrari M., eds. *Sensors and microsystems*, proceedings of the 17th National conf. (Brescia, Italy, Feb. 5–7, 2013). Cham, Springer, 2014. xiii, 478 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00684-0

5. Yafarov R. K. *Physics of microwave vacuum-plasma nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 216 p. (In Russian).

6. Lampert M. A., Mark P. *Current injection in solids*. Cambridge, MA, Academic Press, 1970. 351 p.

7. Yafarov R. K., Shabunin N. O. Contact transport and field emission properties of low-dimensional 2D carbon heterostructures. *Russ. Microelectron.*, 2022, vol. 51, no. 6, pp. 439–443. https://doi.org/10.1134/S106373972270007X

8. Oura K., Lifshits V. G., Saranin A. A., Zotov A. V., Katayama M. *Surface physics: An introduction*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2003. 452 p.

9. Vol'kenshteyn F. F. *Electronic processes on the surface of semiconductors during chemisorption*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 432 p. (In Russian).

10. Gaman V. I. *Physics of semiconductor gas sensors*. Tomsk, Izd-vo nauch.-tekh. lit., 2012. 110 p. (In Russian).

The article was submitted 19.04.2024; approved after reviewing 27.05.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Alexander V. Skripal – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Solid State Physics Department, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya st., 83), skripala_v@sgu.ru

Nikita A. Trunilin – Student, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya st., 83), hjkrryh5@gmail.com

Ravil K. Yafarov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Solid State Physics Department, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya st., 83), Chief Researcher of the Laboratory of Submicron Electron-Ion Technology Saratov Branch of the V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 410019, Saratov, Zelenaya st., 38), pirpc@yandex.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2004 по 2023 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

Научная статья
УДК 621.382.323
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-585-594
EDN: GMKPOI

Методика оптимизации электрофизических характеристик МОП-транзистора с использованием приборно-технологического моделирования

***Д. Жангиреев*[1,2], *А. В. Шемякин*[2], *С. О. Белостоцкая*[2], *А. С. Сивченко*[2]**

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

zhangireyev@inbox.ru

Аннотация. Приборно-технологическое моделирование для оптимизации характеристик МОП-транзистора путем симуляции маршрута его изготовления и вариации параметров технологических процессов позволяет определить оптимальные параметры технологических процессов, а также может использоваться для оптимизации конструкции транзистора и улучшения его электрофизических характеристик. Оптимизация осуществляется на этапе разработки технологии. От правильно построенной модели и, как следствие, конечных результатов оптимизации будут зависеть характеристики ИС. В работе в результате процедуры оптимизации определены входные (технологические) параметры выбранного технологического узла и выходные значения характеристик прибора. Рассмотрены ключевые факторы, влияющие на быстродействие МОП-транзистора, по которым формируется расчетный проект. Проведено моделирование *n*-канального МОП-транзистора с различными значениями параметров дозы и энергии ионов технологической операции ионной имплантации для корректировки порогового напряжения. Получены оптимизированные электрофизические параметры *n*-канального МОП-транзистора, удовлетворяющие следующим критериям оптимизации: при номинале порогового напряжения (0,85 ± 0,05) В определены его оптимальные значения по крутизне, токам насыщения и утечки.

Ключевые слова: МОП-транзистор, компактная модель, методика оптимизации, электрофизические параметры, пороговое напряжение, крутизна, ток утечки, ток насыщения, быстродействие, ионная имплантация, Sentaurus TCAD, PCM-Studio, Sentaurus Optimizer

© Д. Жангиреев, А. В. Шемякин, С. О. Белостоцкая, А. С. Сивченко, 2024

Для цитирования: Жангиреев Д., Шемякин А. В., Белостоцкая С. О., Сивченко А. С. Методика оптимизации электрофизических характеристик МОП-транзистора с использованием приборно-технологического моделирования// Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 585–594. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-585-594. – EDN: GMKPOI.

Original article

A procedure for optimizing the electro-physical characteristics of the MOSFET using device and process simulation

D. Zhangireyev[1,2], A. V. Shemyakin[2], S. O. Belostotskaya[2], A. S. Sivchenko[2]

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

zhangireyev@inbox.ru

Abstract. In order to get MOSFET characteristics optimized device and process simulation could be done by means of its process flow parameters variation. It also allows determining the optimal technological process parameters and may be used to optimize the transistor design and to improve its electro-physical characteristics. As a rule such an optimization takes place at the earliest stages of technology development. The IC characteristics will depend on the correctly built model and, as a consequence, on final results of optimization. In this work, as a result of optimization procedure the input (process) parameters of selected process unit. Output values of device characteristics are determined as well. The key factors affecting the performance of the MOSFET, on which the computational design is formed, are considered. The simulation of *n*-channel MOSFET with different values of dose and ion energy parameters of the ion implantation process operation was performed for threshold voltage correction. The optimized physical parameters of *n*-channel MOSFET were obtained matching the following criteria: at a certain threshold voltage rating of (0.85 ± 0.05) V the optimal values in terms of transconductance, saturation current and leakage current have been determined.

Keywords: MOSFET, compact model, optimization technique, physical parameters, threshold voltage, steepness, leakage current, saturation current, speed performance, ion implantation, Sentaurus TCAD, PCM-Studio, Sentaurus Optimizer

For citation: Zhangireyev D., Shemyakin A. V., Belostotskaya S. O., Sivchenko A. S. A procedure for optimizing the electro-physical characteristics of the MOSFET using device and process simulation. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 585–594. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-585-594. – EDN: GMKPOI.

Введение. Проблема оптимизации (настройки) параметров технологического процесса и моделей, используемых в современных программных комплексах автоматизированного проектирования в микроэлектронике, в настоящее время является важной и актуальной [1]. Развитие и использование точных моделей технологических процессов и приборов позволяют работать с контролируемыми объектами, такими как параметры

отдельной технологической операции, электрофизические параметры слоев или параметры схемотехнической модели прибора на выходе изготовления [2].

На сегодняшний день разработано множество систем численного моделирования технологических процессов и приборных характеристик полупроводниковых структур. Методы численного решения уравнений переноса являются эффективным инструментом для моделирования и анализа полупроводниковых приборов. Многомерные численные модели могут применяться на стадии разработки приборов, оптимизации их структур, выбора полупроводникового материала и параметров технологического процесса [3].

Цель настоящей работы – получение оптимизированных электрофизических параметров *n*-канального МОП-транзистора, удовлетворяющих следующим критериям оптимизации: при номинале порогового напряжения (0,85±0,05) В достичь в совокупности его оптимальных значений по крутизне, току насыщения и току утечки.

Методика экспериментов. Одна из задач проектирования изделия микроэлектроники – оптимизация технологического маршрута изготовления ИС с целью обеспечения высокого коэффициента выхода годных, а также получения наилучших характеристик элементной базы при определенных в ходе проектирования режимах технологических операций. Для получения оптимальных значений режимов технологических операций используются компактные модели. Такие модели элемента схемы представляют собой математические и физические описания поведения этого элемента схемы. Компактное моделирование относится к созданию компактных моделей технологического процесса изготовления ИС путем извлечения параметров элементарной модели для точного прогнозирования поведения элементов схемы конкретной технологии [4]. Основная причина использования компактной модели в полупроводниковой промышленности – рентабельная и эффективная оптимизация параметров элементов ИС [5].

Генерация компактной модели (Process Compact Model, PCM) осуществляется программой PCM-Studio. Программа использует концепцию компактных моделей, которые строятся на основе аппроксимации результатов численных экспериментов или физических измерений полиномиальными функциями Эрмита [6].

Предлагаемая методика оптимизации выходных электрофизических параметров ограничивается оптимизацией прибора и включает в себя решение следующих задач:

1) выбор ключевого технологического узла, который в большей степени влияет на выбранные электрофизические параметры;

2) создание дерева эксперимента для технологического маршрута изготовления прибора и его сквозное моделирование (от технологии до электрофизики) с контролем выходных параметров;

3) дополнение дерева ветками эксперимента по оптимизации технологических параметров, которые состоят из комбинаций доз и энергий ионов операции ионной имплантации;

4) сквозное моделирование оптимизированного дерева эксперимента;

5) анализ чувствительности выходных параметров к входным;

6) создание и верификация компактной модели в программной среде PCM-Studio;

7) оптимизация электрофизических характеристик транзистора с использованием полученной компактной модели с помощью утилиты Sentaurus Optimizer.

Методику оптимизации электрофизических параметров разрабатывали для *n*-МОП-транзистора на объемном кремнии с эпитаксиальной структурой и LOCOS-изоляцией. Исходная подложка – 7.5 КДБ 12/КДБ 0.01 (100). Отметим, что в процессе моделирова-

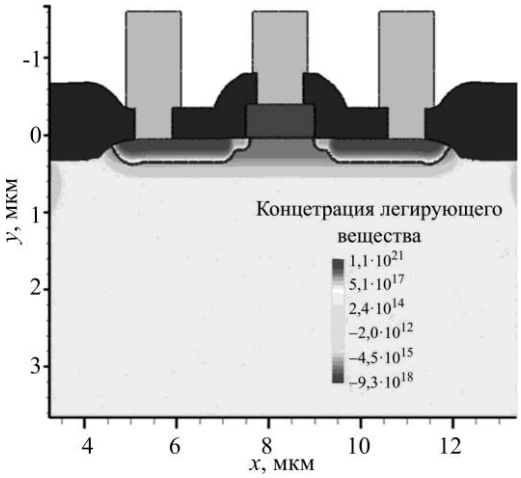


Рис. 1. Разрез исследуемого транзистора
Fig. 1. Cut of the investigated transistor

ния учитывали только эпитаксиальную часть подложки, так как все электрофизические параметры рассчитывали в режимах без смещения на подложке. На рис. 1 показан разрез исследуемого транзистора.

Наиболее значимыми технологическими факторами, вносящими основной вклад в соотношение тока открытого исследуемого транзистора к току закрытого транзистора, являются параметры технологических операций формирования канала транзистора, в частности ионная имплантация легирующей примеси в область канала транзистора [7, с. 29–74]. В качестве входных технологических параметров выбрали значения дозы и энергии пучка ионов для операции ионной имплантации, которые формируют профиль распределения примеси в канале транзистора. Виртуальный эксперимент формировали путем взаимного перебора параметров. Однако в производстве при ионной имплантации применяются параметры tilt и rotate – угол наклона пучка имплантируемых ионов относительно поверхности и поворот пластины соответственно. Значения этих параметров фиксированные: tilt = 7°, rotate = 0. В эксперименте данные параметры не использовались по нескольким причинам: слабое влияние на выходные параметры; значительное увеличение длительности эксперимента и, следовательно, увеличение расчетного времени; номиналы параметров в установке ионной имплантации совпадают с заданными номиналами в среде TCAD.

Диапазон значений варьируемых параметров эксперимента в оболочке Sentaurus Workbench следующий: доза имплантации (dose) $9\cdot10^{11}$, $1\cdot10^{12}$, $2\cdot10^{12}$, $3\cdot10^{12}$, $4\cdot10^{12}$ ат/см^2; энергия имплантации (energy) 50, 55, 60, 65, 70 кэВ.

Эксперимент с использованием программной среды Sentaurus TCAD. Первый этап проведения эксперимента с применением Sentaurus TCAD и оболочки Sentaurus Workbench – технологическое моделирование транзистора. Далее с помощью отдельного инструмента осуществляли оптимизацию расчетной конечно-разностной сетки (рис. 2), предназначенной для электрофизического моделирования [8].

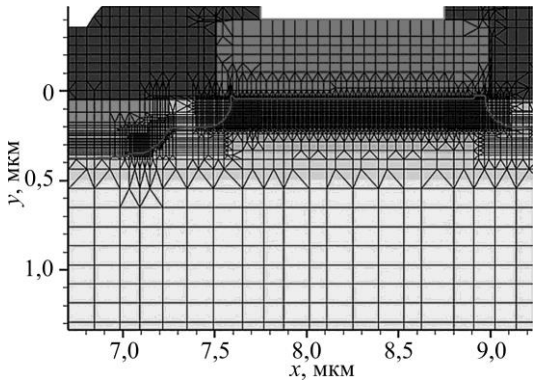


Рис. 2. Вид оптимизированной конечно-разностной сетки сечения транзистора
Fig. 2. View of the optimized finite-difference grid of the transistor cross-section

По окончании генерации оптимизированной конечно-разностной сетки для инструмента SDevice создавали командные файлы, в которых указывали начальные условия, физические и математические модели для расчетов и условия моделирования. После сквозного TCAD-моделирования одной ветки эксперимента следует генерация компактной PCM-модели.

Приведем последовательность этапов построения и использования PCM-модели: 1) параметризация маршрута моделирования; 2) анализ чувствительности; 3) построение вычислительной модели экс-

перимента (Design-of-Experiment); 4) создание и верификация PCM-модели; 5) оптимизация прибора с помощью PCM-модели.

Для получения результатов анализа чувствительности в заданном диапазоне варьировали значения выбранного входного параметра при номинальных значениях остальных входных параметров. Для каждого набора параметров проводили сквозное TCAD-моделирование. Анализ чувствительности позволяет определить, как различные входные параметры влияют на работу прибора [9].

Для построения вычислительной модели эксперимента проведено 25 численных экспериментов. Расчетное время с вариацией двух исследуемых параметров составило чуть более 40 ч. Если в эксперимент включить еще один варьируемый параметр, например технологическую вариацию температуры с пятью значениями, при которой формируется подзатворный окисел, затраченное время увеличится примерно в 5 раз и составит ~ 200 ч. Также время увеличится при использовании связки SProcess-SDE. Расчетное время можно уменьшить, если применять более простые модели диффузии, ионной имплантации, рекомбинации и т. д. Дерево эксперимента представлено на рис. 3.

Family Tree | Variable Values

		dose	energy								Ion	Ioff	Vtgm	gm	Vpgm
1			50	--	--	--	--	--	--	--	2.5723e-04	7.135e-14	0.812	1.049e-04	0.999
2			55	--	--	--	--	--	--	--	2.5927e-04	9.068e-14	0.811	1.042e-04	0.999
3		9.0000e+11	60	--	--	--	--	--	--	--	2.6143e-04	1.101e-13	0.819	1.036e-04	1.000
4			65	--	--	--	--	--	--	--	2.6312e-04	1.295e-13	0.835	1.013e-04	1.000
5			70	--	--	--	--	--	--	--	2.6442e-04	1.434e-13	0.853	9.605e-05	1.000
6			50	--	--	--	--	--	--	--	2.5441e-04	6.332e-14	0.824	1.097e-04	1.000
7			55	--	--	--	--	--	--	--	2.5676e-04	8.207e-14	0.821	1.078e-04	1.000
8		1.0000e+12	60	--	--	--	--	--	--	--	2.5872e-04	1.013e-13	0.829	1.059e-04	1.000
9			65	--	--	--	--	--	--	--	2.6130e-04	1.209e-13	0.842	1.029e-04	1.000
10			70	--	--	--	--	--	--	--	2.6283e-04	1.413e-13	0.856	9.748e-05	1.000
11			50	--	--	--	--	--	--	--	2.4001e-04	2.311e-14	0.868	1.423e-04	1.050
12			55	--	--	--	--	--	--	--	2.4404e-04	3.464e-14	0.838	1.248e-04	1.050
13	--	2.0000e+12	60	--	--	--	--	--	--	--	2.4789e-04	4.872e-14	0.832	1.161e-04	1.049
14			65	--	--	--	--	--	--	--	2.5027e-04	6.536e-14	0.837	1.117e-04	1.049
15			70	--	--	--	--	--	--	--	2.5310e-04	8.514e-14	0.877	1.066e-04	1.050
16			50	--	--	--	--	--	--	--	2.3043e-04	1.106e-14	1.023	1.796e-04	1.075
17			55	--	--	--	--	--	--	--	2.3715e-04	1.783e-14	0.869	1.312e-04	1.099
18		3.0000e+12	60	--	--	--	--	--	--	--	2.4355e-04	2.671e-14	0.952	1.282e-04	1.050
19			65	--	--	--	--	--	--	--	2.4536e-04	3.890e-14	0.951	1.132e-04	1.050
20			70	--	--	--	--	--	--	--	2.4834e-04	5.437e-14	0.913	1.085e-04	1.100
21			50	--	--	--	--	--	--	--	2.2485e-04	6.674e-15	0.968	2.009e-04	1.153
22			55	--	--	--	--	--	--	--	2.3058e-04	1.051e-14	1.037	1.327e-04	1.100
23		4.0000e+12	60	--	--	--	--	--	--	--	2.3616e-04	1.635e-14	0.978	1.428e-04	1.100
24			65	--	--	--	--	--	--	--	2.3953e-04	2.493e-14	0.989	1.188e-04	1.100
25			70	--	--	--	--	--	--	--	2.4287e-04	3.722e-14	0.966	1.103e-04	1.150

Рис. 3. Вычислительная модель эксперимента для построения компактной модели *n*-МОП-транзистора
Fig. 3. Computational model of experiment for constructing a compact model of the *n*-MOS transistor

Первая связка модулей SDevise-Inspect моделирует проходную характеристику транзистора при напряжениях сток-исток U_{DS} = 0,1 В и затвор-исток $U_{GS} = U_{DD}$ и отображает значения порогового напряжение и крутизны. Вторая связка моделирует случай насыщения, т. е. напряжения сток-исток U_{DS} и затвор-исток U_{GS} равны номиналу питания U_{DD}, а также отображает ток насыщения. Третья связка нужна для получения значений токов утечки при $U_{DS} = U_{DD}$, U_{GS} = 0 В. После сквозного моделирования проводили анализ чувствительности выходных характеристик к изменению входных параметров. Результаты анализа чувствительности приведены на рис. 4.

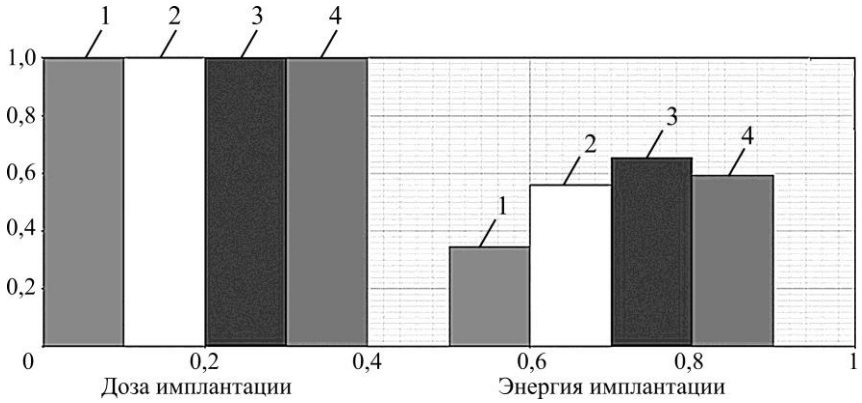


Рис. 4. Результаты анализа чувствительности выходных характеристик 1 – U_t; 2 – g_m; 3 – I_{on}; 4 – I_{off} к изменению входных параметров
Fig. 4. Sensitivity analysis results 1 – U_t; 2 – g_m; 3 – I_{on}; 4 – I_{off}

Поскольку для построения PCM использовали нейронную сеть, рассматривали по пять значений для каждого из двух входных параметров одновременно. Результаты моделирования передавали в PCM-Studio непосредственно из Sentaurus Workbench. Компактную модель получали путем сравнения результатов после PCM- и после TCAD-моделирования.

В режиме «визуальной» оптимизации программы PCM-Studio точки, соответствующие набору значений входных параметров и значениям выходных параметров, полученных с помощью PCM-модели, объединяются одной ломаной. Результаты для различных наборов размещаются на одном рисунке, при этом цвет кривых различен в зависимости от заданных пользователем ограничений на выходные характеристики. На рис. 5 приведены результаты трех сценариев анализа *n*-МОП-транзистора.

В сценарии на рис. 5, *а* представлены все полученные в результате оптимизации электрофизические параметры. В сценарии на рис. 5, *б* – только такие результаты, которые удовлетворяют установленным значениям порогового напряжения 0,85 В с допуском ±5 %. В сценарии на рис. 5, *в* представлены значения, которые могут принимать как входные, так и выходные параметры с величинами максимального рабочего тока 250,5 мкА/мкм ±1 %, крутизны 125 мкА/В^2 ±8 % и тока утечки $6 \cdot 10^{-14}$ мкА/мкм ±8 % с учетом ограничения по пороговому напряжению. С точки зрения проектирования такие угловые отклонения допустимы для транзистора выбранной технологии.

Анализ полученных результатов. Задача по нахождению оптимальных значений решена путем использования средств итерационной оптимизации, встроенных в утилиту Sentaurus Optimizer. Алгоритм поиска решения при этом носит следующий характер. Итерационные приближения контролируются эвристическим процессом поиска оптимального интервала значений технологических параметров. На каждом итерационном шаге исследуется новая область на предмет поиска значений, наиболее отвечающих заданным требованиям. Эвристический процесс на *n*-м шаге должен приводить к нахождению локального оптимума [10]. Остановка итерационного процесса поиска происходит при достижении одного из условий: количество итераций дошло до определенного пользователем программы числа; найден локальный оптимум и последующие итерации дают худшие результаты; превышено компьютерное время (задается пользователем) процесса оптимизации.

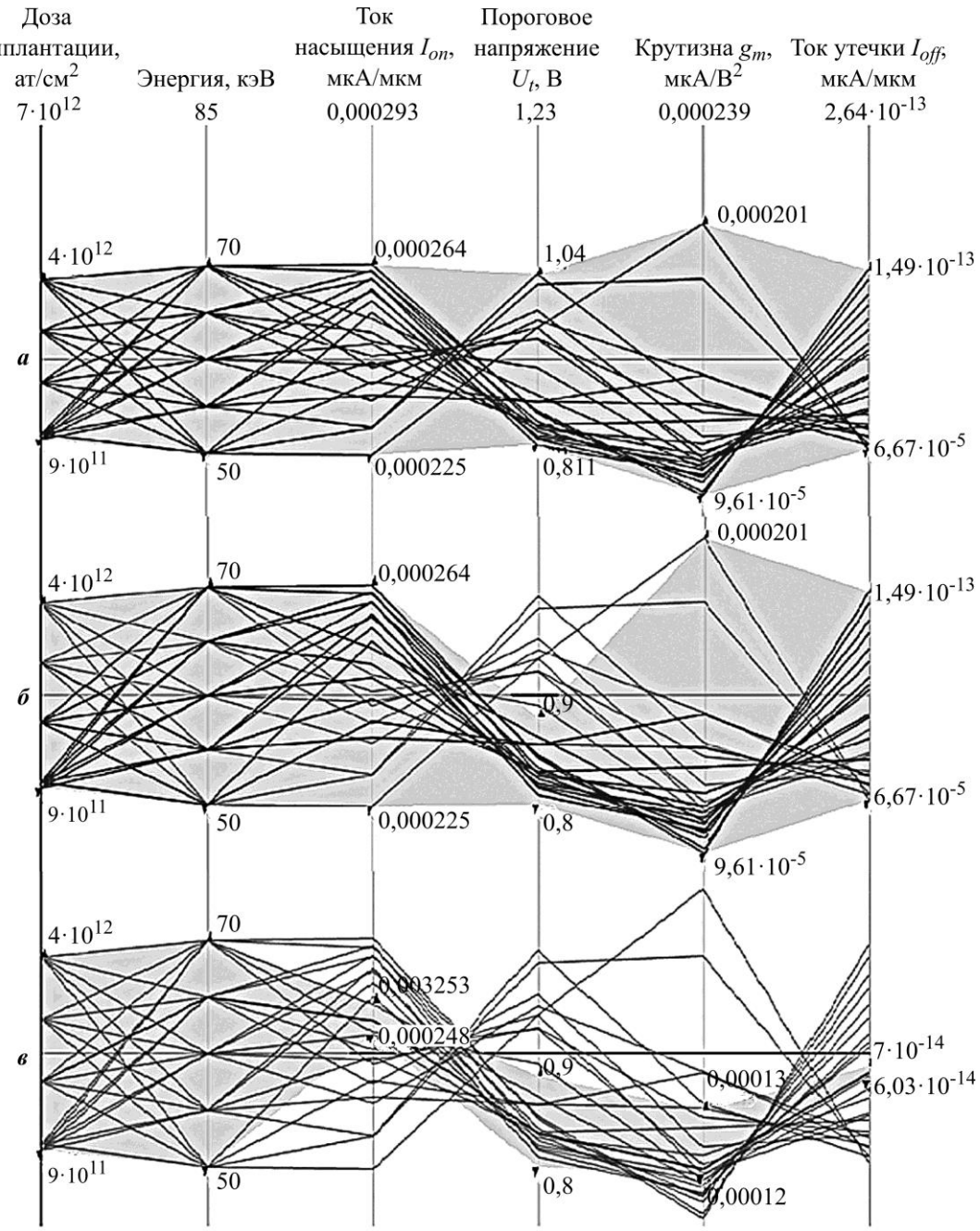


Рис. 5. Процедура оптимизации выходных параметров *n*-МОП-транзистора при разных сценариях (*а–в*)
Fig. 5. Procedure for optimization of output parameters of *n*-MOS transistor under different scenarios (*a–c*)

Критериями оптимизации для поставленной задачи достижения максимального быстродействия транзисторной структуры послужили следующие условия, которые переведены в синтаксис командного файла утилиты Optimizer:

– значение порогового напряжения транзистора должно лежать в диапазоне 0,8–0,9 В и быть максимально приближенным к 0,85 В;

– значения крутизны и тока транзистора в открытом состоянии должны иметь максимально возможные по модулю значения;

– ток утечки из области стока должен быть минимальным при напряжении затвор-исток $U_{GS} = U_{DD}$.

Требованиям перечисленных условий максимально удовлетворяют следующие значения технологических параметров операции ионной имплантации: доза имплантации (dose) $2{,}4 \cdot 10^{12}$ ат./см^2, энергия имплантации (energy) 65 кэВ. Приведем компромиссные значения выходных параметров от полученных входных параметров при оптимальных технологических условиях имплантации:

Ток насыщения I_{on} ..... 252 мкА/мкм
Пороговое напряжение U_t..... 0,842 В
Крутизна g_m ..... 128 мкА/В^2
Ток утечки I_{off}..... $6{,}53 \cdot 10^{-14}$ мкА/мкм

Заключение. Предложенная методика оптимизации электрофизических характеристик транзистора позволяет получать электрофизические параметры *n*-МОП-транзистора, удовлетворяющие заданным критериям оптимизации. Методика дает возможность воспроизвести результаты для транзистора другого типа проводимости, а также для другой технологии элементной базы с внесением корректировки в проект и командные файлы утилит и программ среды Sentaurus Workbench.

Литература

1. ***Козлов А. В., Красюков А. Ю., Крупкина Т. Ю., Чаплыгин Ю. А.*** Моделирование характеристик и оптимизация конструктивно-технологических параметров интегральных магниточувствительных элементов в составе микро- и наносистем // Изв. вузов. Электроника. 2015. Т. 20. № 5. С. 489–490. EDN: UNSUQR.

2. ***Lin Y.-K.*** Compact modeling of advanced CMOS and emerging devices for circuit simulation: diss. for the PhD (Eng.). Berkeley: Univ. of California, 2019. 118 p.

3. ***Зубченко К. А.*** Приборно-технологическое моделирование как метод исследования полупроводниковых структур // Молодой ученый. 2017. № 28 (162). С. 31–33. EDN: ZBFYUJ.

4. ***Saha S. K.*** Compact models for integrated circuit design: Conventional transistors and beyond. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2016. XI, 538 p.

5. ***Kuhn K. J.*** Considerations for ultimate CMOS scaling // IEEE Transactions on Electron Devices. 2012. Vol. 59. No. 7. P. 1813–1828. https://doi.org/10.1109/TED.2012.2193129

6. 25nm CMOS Omega FinFETs / ***F.-L. Yang, H.-Y. Chen, F.-Ch. Cheng et al.*** // Digest. International Electron Devices Meeting. San Francisco, CA: IEEE, 2002. P. 255–258. https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175826

7. ***Красников Г. Я.*** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Изд. 2-е, испр. М.: Техносфера, 2011. 800 с. EDN: PZDVKZ.

8. TCAD framework // Synopsys [Электронный ресурс]. URL: https://www.synopsys.com/silicon/tcad/framework.html (дата обращения: 10.09.2020).

9. ***Тихомиров П., Пфеффли П., Зорзи М.*** Система Sentaurus TCAD компании Synopsys: Новое поколение приборно-технологических САПР // Электроника: НТБ. 2006. № 7 (73). С. 89–95. EDN: HVVZZZ.

10. ***Абрамов О. В., Лагунова А. Д.*** Об использовании эвристических алгоритмов в задачах оптимального параметрического синтеза // Информатика и системы управления. 2021. № 2 (68). С. 34–46. https://doi.org/10.22250/isu.2021.68.34-46 EDN: WCJHKK.

Статья поступила в редакцию 22.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2024 г.;
принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Жангиреев Даулет – магистрант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер отдела интегральных микросхем НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), zhangireyev@inbox.ru

Шемякин Александр Валерьевич – начальник Научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), ashemyakin@tcen.ru

Белостоцкая Светлана Олеговна – старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), s.belostotskaya@tcen.ru

Сивченко Александр Сергеевич – кандидат технических наук, инженер-конструктор Научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), asivchenko@yandex.ru

References

1. Kozlov A. V., Krasjukov A. Yu., Krupkina T. Yu., Chaplygin Yu. A. Characteristics simulation and optimization of constructive and technological parameters of integral magnetosensitive elements as part of micro- and nanosystems. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics,* 2015, vol. 20, no. 5, pp. 489–490. (In Russian). EDN: UNSUQR.

2. Lin Y.-K. *Compact modeling of advanced CMOS and emerging devices for circuit simulation,* diss. for the PhD (Eng.). Berkeley, Univ. of California, 2019. 118 p.

3. Zubchenko K. A. Device and process simulation as a method of semiconductor structures study. *Molodoy uchenyy,* 2017, no. 28 (162), pp. 31–33. (In Russian). EDN: ZBFYUJ.

4. Saha S. K. *Compact models for integrated circuit design: Conventional transistors and beyond.* Boca Raton, FL, Taylor & Francis, 2016. xi, 538 p.

5. Kuhn K. J. Considerations for ultimate CMOS scaling. *IEEE Transactions on Electron Devices,* 2012, vol. 59, no. 7, pp. 1813–1828. https://doi.org/10.1109/TED.2012.2193129

6. Yang F.-L., Chen H.-Y., Chen F.-Ch., Huang Ch.-Ch., Chang Ch.-Y., Chiu H.-K., Lee Ch.-Ch., Chen Ch.-Ch. et al. 25nm CMOS Omega FinFETs. *Digest. International Electron Devices Meeting.* San Francisco, CA, IEEE, 2002, pp. 255–258. https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175826

7. Krasnikov G. Ya. *Constructive and technological features of submicron MOSFETs.* 2nd ed., upd. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 800 p. (In Russian). EDN: PZDVKZ.

8. TCAD framework. *Synopsys.* Available at: https://www.synopsys.com/silicon/tcad/framework.html (accessed: 10.09.2020).

9. Tizhomirov P., Pfeffli P., Zorzi M. Synopsys system Sentaurus TCAD. Device-technology new generation CAD. *Elektronika: NTB = Electronics: STB,* 2006, no. 7 (73), pp. 89–95. (In Russian). EDN: HVVZZZ.

10. Abramov O. V., Lagunova A. D. On the use of heuristic algorithms in the problems of optimal parametric synthesis. *Informatika i sistemy upravleniya,* 2021, no. 2 (68), pp. 34–46. (In Russian). https://doi.org/10.22250/isu.2021.68.34-46 EDN: WCJHKK.

The article was submitted 22.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Daulet Zhangireyev – Master's degree student of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the Integrated Circuits Department, SMC "Technological Center" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), zhangireyev@inbox.ru

Alexandr V. Shemyakin – Head of the Research Laboratory of Advanced Element Base and Technological Routes of Microelectronics, SMC "Technological Center" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), ashemyakin@tcen.ru

Svetlana O. Belostotskaya – Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Advanced Element Base and Technological Routes of Microelectronics, SMC "Technological Center" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), s.belostotskaya@tcen.ru

Alexandr S. Sivchenko – Cand. Sci. (Eng.), Design Engineer of the Research Laboratory of Advanced Element Base and Technological Routes of Microelectronics, SMC "Technological Center" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), asivchenko@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): https://www.ural-press.ru/catalog
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- **через Агентство** «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- **ООО «Руспресса»**: http://abcpress.ru/
- **ООО «ГЛОБАЛПРЕСС»**: globalpress.ms@mail.ru
- **подписное агентство** «Криэйтив Сервис Бэнд»: https://periodicals.ru/
- **редакцию** – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья
УДК 621.383:538.935
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-595-607
EDN: AMYMIJ

Расчет КПД фотодиода при наличии генерации и рекомбинации в области пространственного заряда

М. А. Сауров[1,2], А. В. Лакалин[3], М. Г. Путря[2]

[1]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[3]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия

michael15-52@mail.ru

Аннотация. При проектировании фотодетекторов, применяемых в условиях внешнего воздействия, необходимо учитывать изменения электрических характеристик, обусловленных токами генерации и рекомбинации на возникающих дефектах кристаллической решетки. В работе приведен вывод общего выражения для генерационно-рекомбинационных токов в области пространственного заряда *p*–*n*-перехода. Представлен алгоритм расчета ВАХ фотодиодов с учетом генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда фотодиода и эффекта Пула – Френкеля. Разработан алгоритм расчета КПД фотодиода при наличии дефектов различных типов. Приведены результаты расчетов, позволяющие оценить влияние дефектов на электрические характеристики фотодиодов.

Ключевые слова: преобразователь излучения, фотодиод, генерация, рекомбинация

Для цитирования: Сауров М. А., Лакалин А. В., Путря М. Г. Расчет КПД фотодиода при наличии генерации и рекомбинации в области пространственного заряда // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 595–607. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-595-607. – EDN: AMYMIJ.

© М. А. Сауров, А. В. Лакалин, М. Г. Путря, 2024

Original article

Efficiency calculation of photodiode with generation and recombination in the space charge region

***M. A. Saurov*[1,2], *A. V. Lakalin*[3], *M. G. Putrya*[2]**

[1]*SMC "Technological Centre", Moscow, Russia*
[2]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[3]*Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

michael15-52@mail.ru

Abstract. In the design of photodetectors used under external influences, it is necessary to consider changes in electrical characteristics caused by generation and recombination currents at emerging defects in the crystal lattice. In this work, general expression derivation for generation and recombination currents in the space charge region of *p–n* junction is given. An algorithm for calculating the current-voltage characteristics of photodiodes with account for generation and recombination processes in the space charge region of photodiode and for Poole – Frenkel effect is presented. An algorithm for calculating the efficiency of a photodiode in the presence of defects of various types has been designed. The results of calculations allowing the evaluation of defects influence on electrical characteristics of photodiodes are given.

Keywords: energy converter, photodiode, generation, recombination

For citation: Saurov M. A., Lakalin A. V., Putrya M. G. Efficiency calculation of photodiode with generation and recombination in the space charge region. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 595–607. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-595-607. – EDN: AMYMIJ.

Введение. Электрические и оптические характеристики *p–i–n*-фотодиодов во многом зависят от наличия и концентрации дефектов кристаллической решетки. В связи с этим возникают сложности при применении *p–i–n*-фотодиодов в условиях, где они подвергаются внешнему воздействию, в том числе радиационному. Накопление дефектов ухудшает такие параметры фотодиода, как темновой ток и КПД. Поэтому при проектировании подобных устройств необходимо учитывать изменения электрических характеристик, возникающих при появлении различных дефектов, которые являются центрами рекомбинации и генерации, создающими глубокие уровни в запрещенной зоне полупроводника.

В настоящей работе предлагаются алгоритмы расчета токов генерации и рекомбинации в области пространственного заряда (ОПЗ), а также КПД фотодиода при наличии глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника.

Вывод общего выражения для генерационно-рекомбинационных токов в ОПЗ *p–n*-перехода. Вычисление токов генерации и рекомбинации в ОПЗ $I_{GR}(U)$ проводи-

лось во многих работах [1–3], где с учетом определенных допущений получены аналитические выражения. Будем исходить из общего выражения

$$I_{GR} = qS \int_{-w_p}^{w_n} R(x)\,dx,$$

где $R(x)$ – скорость генерации и рекомбинации носителей заряда в ОПЗ; w_n, $-w_p$ – границы ОПЗ в n- и p-областях соответственно [1]. Точка $x = 0$ соответствует металлургической границе p–n-перехода.

Приведем основные теоретические положения (рассматривается резкий p–n-переход).

Ток, обусловленный генерацией и рекомбинацией носителей заряда в ОПЗ p–n-перехода через простой двухзарядный центр, определяется выражением [4]

$$I_{GR} = qS \int_{-w_p}^{w_n} \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{nj} c_{pj} N_{tj} (n(x)p(x) - n_{1j} p_{1j})}{c_{nj}(n(x) + n_{1j}) + c_{pj}(p(x) + p_{1j})}\,dx, \qquad (1)$$

где q – заряд электрона; S – площадь p–n-перехода; j – номер рекомбинационного центра; c_n, c_p – коэффициенты захвата электронов и дырок рекомбинационными центрами; N – концентрация центров; n_1, p_1 – концентрации электронов и дырок, когда уровень Ферми совпадает с уровнем рекомбинационного центра; $n(x)$, $p(x)$ – концентрации свободных электронов и дырок в ОПЗ соответственно.

При прямом смещении ($U > 0$) из выражения (1) получаем ток рекомбинации в ОПЗ, при обратном смещении ($U < 0$) – ток генерации в ОПЗ. Для тока обратного смещения из (1) следует

$$I_G = qS \int_{-w_p}^{w_n} \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{nj} c_{pj} n_{1j} p_{1j} N_{tj}}{c_{nj} n_{1j} + c_{pj} p_{1j}}\,dx, \qquad (2)$$

так как при $U < 0$ произведение концентраций носителей заряда в ОПЗ $n(x)p(x) \ll n_{1j} p_{1j}$.

Формула (2) справедлива при больших обратных смещениях. Однако при малых обратных смещениях $n(x)p(x) \sim n_0 p_0 = n_{1j} p_{1j}$, при $U \sim 0$ по формуле (2) получаем $I_G \neq 0$, что неверно. Кроме того, выражения (1) и (2) не учитывают эффекта Пула – Френкеля [5] при $U < 0$.

Для учета эффекта Пула – Френкеля в формулу (1) предлагается ввести множитель $\exp\left(\frac{\beta_F \sqrt{F(x)}}{kT}\right)$, где $\beta_F = \frac{q^{3/2}}{\sqrt{\pi\varepsilon\varepsilon_0}}$ – постоянная Пула – Френкеля; $F(x)$ – напряженность электрического поля в ОПЗ. Тогда выражение (1) будет иметь вид

$$I_{GR} = qS \int_{-w_p}^{w_n} \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{nj} c_{pj} N_{tj} \left(n(x)p(x) - n_{1j} p_{1j} \exp\left(\frac{\beta_F \sqrt{F(x)}}{kT}\right)\right)}{c_{nj}(n(x) + n_{1j}) + c_{pj}(p(x) + p_{1j})}\,dx. \qquad (3)$$

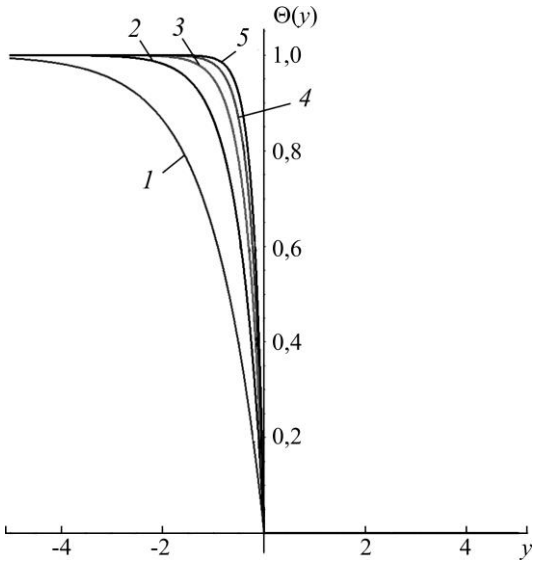


Рис. 1. Графики функции Θ(*y*) для различных значений параметра α: *1* – α = 1; *2* – α = 2; *3* – α = 3; *4* – α = 4; *5* – α = 5

Fig. 1. Graphs of the Θ(*y*) function for various values of the parameter α: *1* – α = 1; *2* – α = 2; *3* – α = 3; *4* – α = 4; *5* – α = 5

Формула (3) справедлива как при больших обратных смещениях: $(n(x)p(x) << n_{1j}p_{1j}\exp\left(\beta_F\sqrt{F(x)}/kT\right))$, так и при больших прямых смещениях: $(n(x)p(x) >> n_{1j}p_{1j}\exp\left(\beta_F\sqrt{F(x)}/kT\right))$. Однако при $U \sim 0$, когда $n(x)p(x) \sim n_0p_0 = n_{1j}p_{1j}$, разность в скобках числителя выражения (3) будет отличаться от нуля и, соответственно, $I_{GR}(0) \neq 0$, что неверно. Поэтому для выражения (3) необходимо сделать еще одно уточнение.

Пусть $\Theta(y)$ – некоторая корректировочная функция, которая определяется как

$$\Theta(y) = \begin{cases} 0, & y \geq 0, \\ 1-\exp(-\alpha y), & y < 0, \end{cases} \qquad (4)$$

где α – характерный параметр, определяющий скорость изменения $\Theta(y)$ при $y < 0$.

Вид функции (4) при разных значениях параметра α представлен на рис. 1.

С помощью корректировочной функции $\Theta(y)$ выражение (3) можно изменить:

$$I_{GR} = qS\int_{-w_p}^{w_n}\sum_{j=1}^{m}\frac{c_{nj}c_{pj}N_{tj}\left(n(x)p(x) - n_{1j}p_{1j}\cdot\exp\left(\frac{\beta_F\sqrt{F(x)}}{kT}\Theta(U)\right)\right)}{c_{nj}(n(x)+n_{1j})+c_{pj}(p(x)+p_{1j})}dx. \qquad (5)$$

Экспонента в (5) при $U \geq 0$ равна 1, при $U << 0$ равна $\left(\frac{\beta_F\sqrt{F(x)}}{kT}\right)$. Таким образом, осуществляется учет эффекта Пула – Френкеля. При небольших обратных напряжениях ($U \sim 0$) будет происходить непрерывный переход от первого участка ко второму. Характер этого перехода определяется значением параметра α. При этом $I_{GR}(0) = 0$. Таким образом, формула (5) позволяет рассчитать токи генерации и рекомбинации в ОПЗ в едином вычислительном цикле при изменении напряжения от отрицательных до положительных значений по сравнению с классическими методами вычисления токов генерации и рекомбинации [1, 6].

Алгоритм расчета токов рекомбинации и генерации в ОПЗ. Для расчета токов рекомбинации и генерации в ОПЗ применяется следующий алгоритм:

Шаг 1. Задание параметров материала *p–n*-перехода: ε, m_n, m_p, E_{g0}, α, β и параметров *p–n*-перехода: N_a, N_d, *S*.

Шаг 2. Задание параметров каждого рекомбинационного центра: $\{c_{nj}, c_{pj}, N_{tj}, E_{tnj}(300\text{ К})\}$, $j = 1, \ldots, m$.

Шаг 3. Задание температуры T и расчет параметров $E_g(T)$, $N_C(T)$, $N_V(T)$, $n_i(T)$, $V_d(T)$, $E_{tn\,j}(T)$, $E_{tp\,j}(T)$, $n_{1\,j}(T)$, $p_{1\,j}(T)$:

$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{\beta T}, \quad N_C = 2\left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{3/2}, \quad N_V = 2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{3/2},$$

$$n_i^{\,2} = N_C N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad V_d = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right), \quad E_{tn\,j} = E_{tn\,j}(300\ \text{K}) - \frac{E_g(300\ \text{K}) - E_g}{2},$$

$$E_{tp\,j} = E_g - E_{tn\,j}, \quad n_{1j} = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_{tn\,j}}{kT}\right), \quad p_{1j} = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_{tp\,j}}{kT}\right).$$

Шаг 4. Задание напряжения U и расчет параметров $w_n(U)$, $w_p(U)$, $w(U)$:

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(N_d + N_a)(V_d - U)}{q N_d N_a}}, \quad w_n = \frac{N_a}{N_d + N_a} w, \quad w_p = \frac{N_d}{N_d + N_a} w.$$

Шаг 5. Расчет генерационно-рекомбинационного тока $I_{GR}(U)$ по формуле (5) с учетом (4):

$$I_{GR} = qS \int_{-w_p}^{w_n} \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{n\,j} c_{p\,j} N_{t\,j} \left(n(x)p(x) - n_{1\,j}p_{1\,j} \cdot \exp\left(\frac{\beta_F \sqrt{F(x)}}{kT} \Theta(U) \right) \right)}{c_{n\,j}(n(x) + n_{1\,j}) + c_{p\,j}(p(x) + p_{1\,j})} dx,$$

где $n(x) = N_d \exp\left(-\frac{\Psi(x)}{kT}\right)$, $p(x) = N_a \cdot \exp\left(-\frac{q(V_d - U) - \Psi(x)}{kT}\right)$,

$$\Psi(x) = \begin{cases} 0, & w_n < x, \\ \dfrac{q^2 N_d (w_n - x)^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}, & 0 \le x \le w_n, \\ q(V_d - U) - \dfrac{q^2 N_a (w_p + x)^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}, & -w_p \le x < 0, \\ 0, & x < -w_p; \end{cases} \quad F_x(x) = \begin{cases} 0, & w_n < x, \\ -\dfrac{qN_d(w_n - x)}{\varepsilon\varepsilon_0}, & 0 \le x \le w_n, \\ -\dfrac{qN_a(w_p + x)}{\varepsilon\varepsilon_0}, & -w_p \le x < 0, \\ 0, & x < -w_p; \end{cases}$$

$$\Theta(U) = \begin{cases} 0, & U \ge 0, \\ 1 - \exp(-\alpha U), & U < 0. \end{cases}$$

Здесь Ψ – энергия электрона; F – модуль напряженности электрического поля ($F = -\nabla\varphi = \nabla\Psi / q$, для электрона $\Psi = -q\varphi$, где φ – электрический потенциал).

Значение параметра α функции $\Theta(U)$ подбирается таким образом, чтобы обеспечить наилучшее согласование с экспериментальными данными.

Шаг 6. Повторение шагов 4, 5 для интервала напряжений $U \in [U_{\min}, U_{\max}]$, тем самым формируется зависимость $\{U; I_{GR}(U)\}$.

На рис. 2 представлены темновые генерационно-рекомбинационные ВАХ кремниевого *p*–*n*-перехода, рассчитанные по приведенным формулам для нескольких значений

параметра α функции $\Theta(U)$. Рассматривался *p*–*n*-переход с равномерно распределенными по ОПЗ глубокими центрами (N_t = const). Значения параметров следующие:

– для Si: ε = 11,7; m_n = 1,08m_0; m_p = 0,59m_0; E_{g0} = 1,166 эВ; α = 4,73·10^{-4} эВ/К; β = 636 К [2];

– для *p*–*n*-перехода: T = 293 К; N_a = 10^{18} см$^{-3}$; N_d = 10^{16} см$^{-3}$; S = (9,14 мм)^2;

– для глубоких уровней (m = 1): c_n =1·10^{-8} см$^{-3}$/с; c_p =1·10^{-8} см$^{-3}$/с; N_t =1·10^{13} см$^{-3}$; $E_{tn}(300\ \text{К}) = 0,40$ эВ.

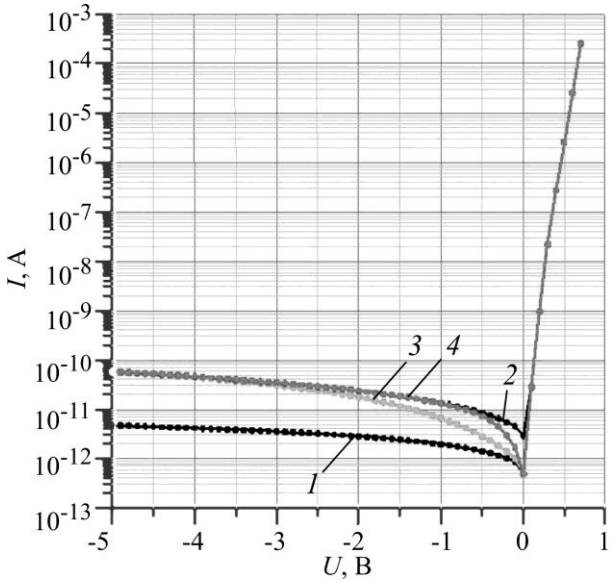


Рис. 2. Темновые генерационно-рекомбинационные ВАХ кремниевого *p*–*n*-перехода, рассчитанные по формуле (5), для разных значений параметра α функции Θ(*U*): *1* – α = 0 (эффект Пула – Френкеля не учитывается); *2* – α = ∞ (с учетом эффекта Пула – Френкеля, но без корректировки вблизи *U* = 0); *3* – α = 1 (с учетом эффекта Пула – Френкеля и с корректировкой вблизи *U* = 0); *4* – α = 5 (с учетом эффекта Пула – Френкеля и с корректировкой вблизи *U* = 0)

Fig. 2. Dark generation-recombination current-voltage characteristics of a silicon *p*–*n* junction, calculated by formula (5) for different values of the parameter α in the Θ(*U*) function: *1* – α = 0 (the Poole – Frenkel effect is not taken into account); *2* – α = ∞ (taking into account the Poole – Frenkel effect, but without adjustment near *U* = 0); *3* – α = 1 (taking into account the Poole – Frenkel effect, with adjustment near *U* = 0); *4* – α = 5 (taking into account the Poole – Frenkel effect, with adjustment near *U* = 0)

Из рис. 2 видно, что применение функции $\Theta(U)$ в (5) позволяет корректно описать поведение обратной ВАХ с учетом эффекта Пула – Френкеля при небольших смещениях. При прямых смещениях все три кривые совпадают. Дальнейшие вычисления генерационно-рекомбинационных токов проводились со значением α = 5.

Расчет токов рекомбинации в ОПЗ. Аналитическое выражение для тока рекомбинации в ОПЗ при прямом смещении ($U > 0$) имеет вид [7, 8]

$$I_R(U) = qS\sum_{j=1}^{m} \frac{c_{nj}c_{pj}N_{tj}n_i^2\left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)-1\right)}{2n_i\sqrt{c_{nj}c_{pj}}\cdot\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)+c_{nj}n_{1j}+c_{pj}p_{1j}} \frac{2kTw(U)}{q(V_d-U)}. \qquad (6)$$

Для оценки адекватности выражения (6) рассчитаем по нему ток рекомбинации через одиночный глубокий уровень ($m = 1$) для трех вариантов его расположения в запрещенной зоне и сравним с точным вычислением согласно (5). Параметры p–n-перехода (температура, коэффициенты захвата и концентрация глубоких уровней) будут такими же, как и ранее, варьируется только энергия активации E_{tn}(300 К): 0,60; 0,45; 0,30 эВ. Результаты расчета по формулам (5) и (6) представлены на рис. 3. На графиках также указаны характерные наклоны $\frac{qU}{kT}$ и $\frac{qU}{2kT}$.

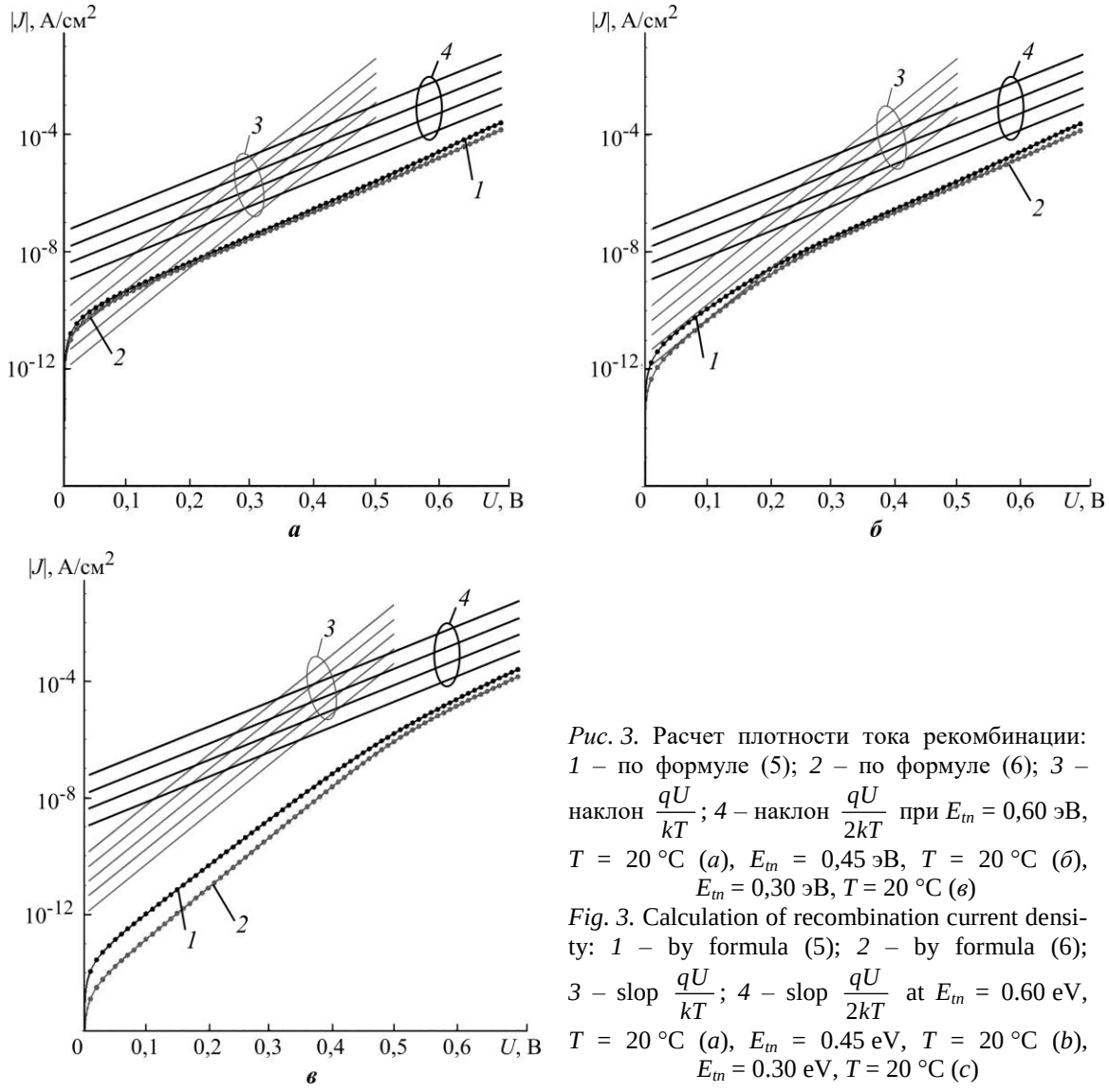


Рис. 3. Расчет плотности тока рекомбинации: *1* – по формуле (5); *2* – по формуле (6); *3* – наклон $\frac{qU}{kT}$; *4* – наклон $\frac{qU}{2kT}$ при E_{tn} = 0,60 эВ, T = 20 °С (*а*), E_{tn} = 0,45 эВ, T = 20 °С (*б*), E_{tn} = 0,30 эВ, T = 20 °С (*в*)

Fig. 3. Calculation of recombination current density: *1* – by formula (5); *2* – by formula (6); *3* – slop $\frac{qU}{kT}$; *4* – slop $\frac{qU}{2kT}$ at E_{tn} = 0.60 eV, T = 20 °С (*a*), E_{tn} = 0.45 eV, T = 20 °С (*b*), E_{tn} = 0.30 eV, T = 20 °С (*c*)

Из представленных зависимостей можно сделать следующие выводы:

– формула (6) по сравнению с (5) дает заниженное значение тока рекомбинации в ОПЗ во всем диапазоне прямых смещений. Соответственно, расчет $R_{np}(U)$ приведет к завышенным значениям $\sqrt{c_n c_p}\,N_t / 2$;

– чем ближе глубокий уровень расположен к середине запрещенной зоны, тем меньше отклонение значений, полученных по формуле (6), от значений, рассчитанных по формуле (5). В области «ненасыщенной» рекомбинации, где $J_R \sim \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$, отклонения значений, рассчитанных по формуле (6), от значений, полученных по формуле (5), больше, чем в области «насыщенной» рекомбинации, где $J_R \sim \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)$;

– область изменения наклона тока рекомбинации от $\frac{qU}{kT}$ к $\frac{qU}{2kT}$ практически одинакова в обоих случаях. Это означает, что положения характерной точки «перегиба» зависимости $R_{np}(U)$ на оси напряжений в обоих случаях также будут практически одинаковыми.

Расчет токов генерации в ОПЗ. Аналитическое выражение для тока генерации в ОПЗ при большом обратном смещении ($U << 0$) имеет вид [3]

$$I_G = qS \int_{-w_p}^{w_n} \sum_{j=1}^{m} \frac{e_{nj}^t e_{pj}^t N_{tj}}{e_{nj}^t + e_{pj}^t} dx = qS \int_{-w_p}^{w_n} \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{nj} c_{pj} n_{1j} p_{1j} N_{tj}}{c_{nj} n_{1j} + c_{pj} p_{1j}} dx . \quad (7)$$

В (7) учтено, что $e_n^t = c_n n_1$ и $e_p^t = c_p p_1$. Видно, что формулы (7) и (2) эквивалентны. С учетом эффекта Пула – Френкеля выражение для тока генерации при $U << 0$ принимает вид

$$I_G = qS \int_{-w_p}^{w_n} \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{nj} c_{pj} N_{tj} \left(n_{1j} p_{1j} \cdot \exp\left(\frac{\beta_F \sqrt{F(x)}}{kT} \right) \right)}{c_{nj} n_{1j} + c_{pj} p_{1j}} dx . \quad (8)$$

В случае N_t = const выражение (8) можно проинтегрировать. В результате получаем

$$I_G = qSw \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{nj} c_{pj} N_{tj} \left(n_{1j} p_{1j} \cdot \exp\left(\frac{\beta_F \sqrt{F_{\text{ср}}}}{kT} \right) \right)}{c_{nj} n_{1j} + c_{pj} p_{1j}}, \quad (9)$$

где $F_{\text{ср}}$ – среднее значение напряженности электрического поля в ОПЗ.

Иногда вместо среднего приводится максимальное значение $F_{\max}$. Для резкого p–n-перехода $F_{\max} = 2F_{\text{ср}}$. При небольших обратных смещениях ($U \sim 0$) выражение (9) применять нельзя.

Для оценки адекватности выражения (9) при $U << 0$ рассчитаем по нему ток генерации через одиночный глубокий уровень ($m = 1$) для трех вариантов его расположения в запрещенной зоне и сравним с точным вычислением согласно (5). Параметры p–n-перехода (температура, коэффициенты захвата и концентрация глубоких уровней) будут такими же, как и ранее, варьируется только энергия активации глубокого центра $E_{tn}(300\ \text{К})$: 0,60; 0,45; 0,30 эВ. Результаты расчета по формулам (5) и (9) представлены на рис. 4. При расчете по формуле (9) брали значения как $F_{\text{ср}}$, так и $F_{\max}$.

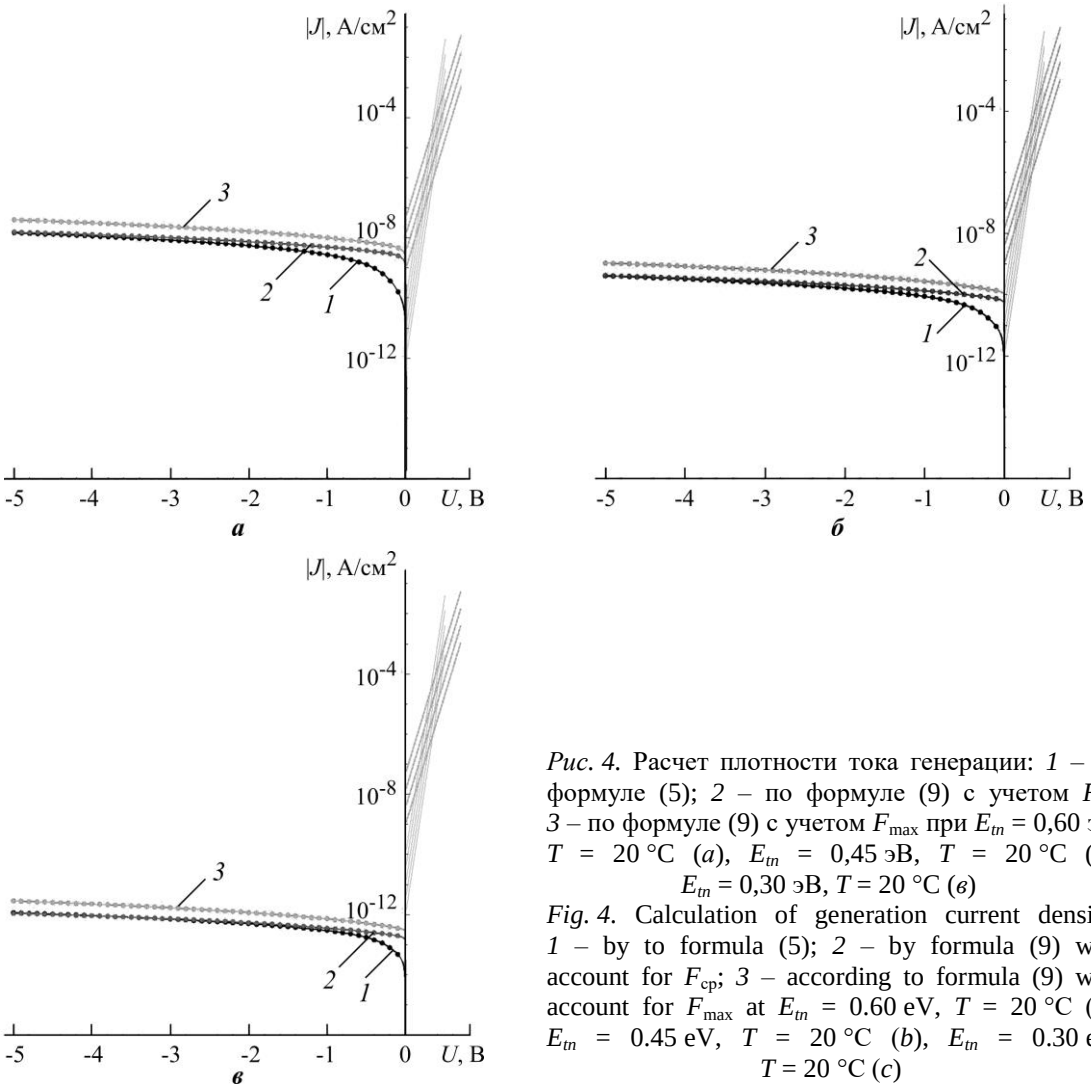


Рис. 4. Расчет плотности тока генерации: *1* – по формуле (5); *2* – по формуле (9) с учетом $F_{ср}$; *3* – по формуле (9) с учетом F_{max} при E_{tn} = 0,60 эВ, T = 20 °С (*а*), E_{tn} = 0,45 эВ, T = 20 °С (*б*), E_{tn} = 0,30 эВ, T = 20 °С (*в*)

Fig. 4. Calculation of generation current density: *1* – by to formula (5); *2* – by formula (9) with account for $F_{ср}$; *3* – according to formula (9) with account for F_{max} at E_{tn} = 0.60 eV, T = 20 °С (*a*), E_{tn} = 0.45 eV, T = 20 °С (*b*), E_{tn} = 0.30 eV, T = 20 °С (*c*)

Из зависимостей на рис. 4 можно сделать следующие выводы:

– формула (9) дает хорошее приближение к (5) при $U << 0$, если в качестве напряженности электрического поля подставлять среднее значение $F_{ср}$. При подстановке максимального значения F_{max} ток генерации оказывается завышенным;

– чем ближе глубокий уровень расположен к середине запрещенной зоны, тем больше отклонение значений, полученных по формуле (9), от значений, полученных по формуле (5), вблизи $U \sim 0$.

Расчет КПД фотодиода. Используя результаты предыдущих расчетов, получаем алгоритм расчета КПД фотодиода с учетом генерационно-рекомбинационных процессов. Как известно, ВАХ идеального диода с учетом фототока описывается выражением [9, 10]

$$I = I_s\left(\exp(qU/(kT)) - 1\right) - I_ф, \qquad (10)$$

где I_s – ток насыщения; $I_ф$ – фототок; первое слагаемое в правой части выражения (10) – темновая ВАХ идеального диода.

По аналогии с (10) представим ВАХ диода с генерационно-рекомбинационным механизмом в ОПЗ с учетом фототока в виде

$$I = I_{GR}(U) - I_{\text{ф}}, \tag{11}$$

где $I_{GR}(U)$ – темновой генерационно-рекомбинационный ток.

Фототок $I_{\text{ф}}$ связан с параметрами оптического излучения:

$$I_{\text{ф}} = qS\frac{\Delta N_{\text{фот}}}{\Delta S\Delta t}(1-R) = qS\frac{\Delta(W_e/(h\nu))}{\Delta S\Delta t}(1-R) = qS\frac{E_e}{h\nu}(1-R), \tag{12}$$

где $\frac{\Delta N_{\text{фот}}}{\Delta S\Delta t}$ – количество фотонов, падающих на единицу площади фотоприемника в единицу времени; W_e – энергия всех падающих фотонов; $h\nu$ – энергия одного фотона; $E_e = \frac{\Delta W_e}{\Delta S\Delta t}$ – интенсивность падающего света (плотность потока энергии, Вт/см^2); R – коэффициент отражения света от поверхности фотоприемника.

Выражение для $I_{\text{ф}}$ – следствие, полученное в работе [9] (6,87) при ν = const. В качестве исходных параметров задаются интенсивность излучения E_e (Вт/см^2), длина волны λ (или частота ν) применяемого излучения, коэффициент отражения света от поверхности фотодиода.

Алгоритм вычисления КПД фотодиода следующий:

Шаг 1. Расчет темновой ВАХ диода с генерационно-рекомбинационным механизмом в ОПЗ при $I = I_{GR}(U)$.

Шаг 2. Задание интенсивности излучения E_e (Вт/см^2). Расчет фототока по формуле (12). Если параметрами оптического излучения пренебречь, то можно сразу задать фототок $I_{\text{ф}}$.

Шаг 3. Построение световой ВАХ диода с генерационно-рекомбинационным механизмом в ОПЗ по формуле (11).

Шаг 4. Расчет максимальной мощности $P_{\max}$, которую фотодиод может отдать на внешнюю нагрузку (в IV квадранте световой ВАХ).

Шаг 5. Расчет КПД фотодиода по формуле

$$\eta_s = \frac{P_{\max}}{E_e S}100\ \%.$$

На рис. 5 показаны результаты расчета КПД кремниевого фотодиода (в линейных и двойных логарифмических осях с разными значениями энергия активации $E_{tn}(300\ \text{К})$: 0,60; 0,45; 0,30 эВ. Интенсивность излучения E_e изменялась от $1\cdot10^{-9}$ до $1\cdot10^{-3}$ Вт/см^2. Коэффициент отражения R = 0,4, длина волны излучения λ = 500 нм. Из графиков видно, что во всех случаях КПД примерно одинаковый и составляет ~ 2,9 %.

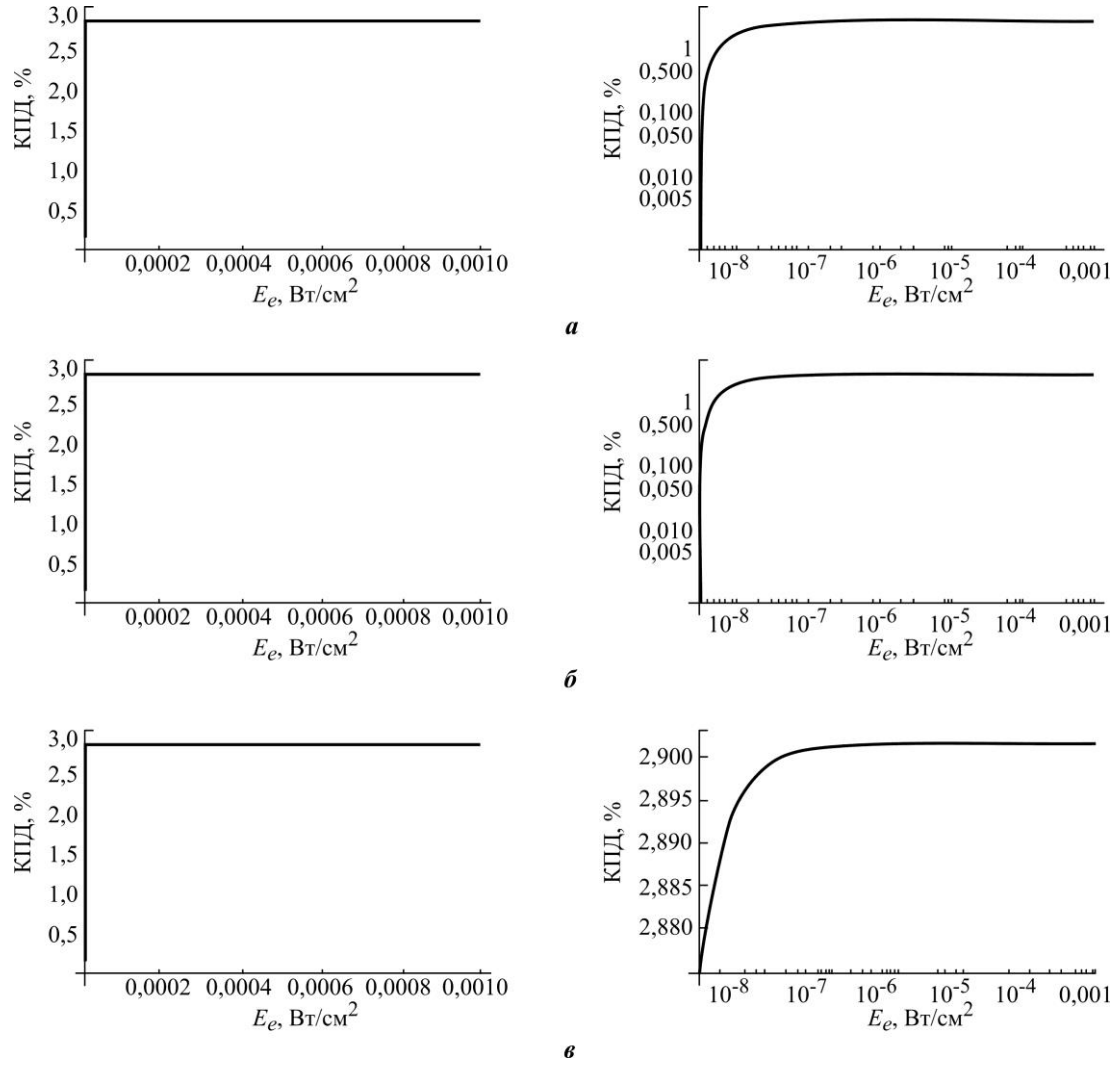


Рис. 5. Расчет КПД кремниевого фотодиода: *а* – E_{tn} = 0,60 эВ, T = 20 °С; *б* – E_{tn} = 0,45 эВ, T = 20 °С; *в* – E_{tn} = 0,30 эВ, T = 20 °С

Fig. 5. Calculation of the efficiency of a silicon photodiode: *a* – E_{tn} = 0.60 eV, T = 20 °C; *b* – E_{tn} = 0.45 eV, T = 20 °C; *c* – E_{tn} = 0.30 eV, T = 20 °C

Заключение. Разработанный подход позволяет рассчитывать ВАХ и КПД фотодиодов при наличии в ОПЗ центров генерации и рекомбинации, создаваемых дефектами различных типов, а также для разных интенсивностей падающего излучения. Разработанный подход также позволяет оценить эффективность прибора при образовании центров генерации и рекомбинации в результате повреждений кристаллической решетки.

Литература

1. ***Sah C.-T., Noyce R. N., Shockley W.*** Carrier generation and recombination in *p–n* junctions and *p–n* junction characteristics // Proceedings of the IRE. 1957. Vol. 45. No. 9. P. 1228–1243. https://doi.org/10.1109/JRPROC.1957.278528

2. ***Sze S. M.*** Semiconductor devices: Physics and technology. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2002. 564 p.

3. ***Булярский С. В., Грушко Н. С.*** Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 399 с.

4. Физика полупроводниковых преобразователей / под ред. ***А. Н. Саурова, С. В. Булярского***. М.: РАН, 2018. 276 с.

5. ***Булярский С. В., Лакалин А. В., Сауров М. А.*** Влияние электрон-фононного взаимодействия и облучения γ-квантами на обратные токи кремниевых фотодиодов // ФТП. 2021. Т. 55. № 1. С. 69–74. https://doi.org/10.21883/FTP.2021.01.50389.9455. – EDN: KHEXKK.

6. ***Старосельский И. В.*** Моделирование тока генерации-рекомбинации носителей заряда в *p–n*-переходе // Микроэлектроника. 1994. Т. 23. № 2. С. 50–56. EDN: KSXULH.

7. ***Булярский С. В., Грушко Н. С., Сомов А. И., Лакалин А. В.*** Рекомбинация в области пространственного заряда и ее влияние на коэффициент передачи биполярного транзистора // ФТП. 1997. Т. 31. № 9. С. 1146–1150. EDN: RYMOPR.

8. ***Булярский С. В., Грушко Н. С., Лакалин А. В.*** Дифференциальные методы определения параметров глубоких уровней по рекомбинационным токам *p–n*-перехода // ФТП. 1998. Т. 32. № 10. С. 1193–1196. EDN: RYNMGN.

9. ***Гаман В. И.*** Физика полупроводниковых приборов: учеб. пособие. 2-е изд., доп. и перераб. Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2000. 426 с.

10. ***Беневоленский С. Б., Метелкин Е. В., Четвериков Н. И., Четверикова И. Ф.*** Физические основы работы полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2003. 340 с.

Статья поступила в редакцию 07.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 19.02.2024 г.;
принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Сауров Михаил Александрович – аспирант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер Научно-исследовательской лаборатории мемристивных систем на основе самоорганизованных наноструктур НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), michael15-52@mail.ru

Лакалин Александр Вячеславович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела разработки и исследования микро- и наносистем Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 119334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), a.v.lakalin@mail.ru

Путря Михаил Георгиевич – доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mishapmg@gmail.com

References

1. Sah C.-T., Noyce R. N., Shockley W. Carrier generation and recombination in *p–n* junctions and *p–n* junction characteristics. *Proceedings of the IRE,* 1957, vol. 45, no. 9, pp. 1228–1243. https://doi.org/10.1109/JRPROC.1957.278528

2. Sze S. M. *Semiconductor devices: Physics and technology.* Hoboken, NJ, J. Wiley & Sons, 2002. 564 p.

3. Bulyarskiy S. V., Grushko N. S. *Generation-recombination processes in active elements.* Moscow, Moscow State Univ. Publ., 1995. 399 p. (In Russian).

4. Saurov A. N., Bulyarskiy S. V. (eds). *Physics of semiconductor converters.* Moscow, RAS, 2018. 276 p. (In Russian).

5. Bulyarskiy S. V., Lakalin A. V., Saurov M. A. Effect of electron-phonon interaction and γ-ray irradiation on the reverse currents of silicon photodiodes. *Semiconductors,* 2021, vol. 55, pp. 86–91. https://doi.org/10.1134/S1063782621010048

6. Starosel'skij I. V. Simulating the charge carrier generation-recombination current in *p–n* junction. *Mikroelektronika,* 1994, vol. 23, no. 2, pp. 50–56. (In Russian). EDN: KSXULH.

7. Bulyarskii S. V., Grushko N. S., Somov A. I., Lakalin A. V. Recombination in the space charge region and its effect on the transmittance of bipolar transistors. *Semiconductors*, 1997, vol. 31, pp. 983–987. https://doi.org/10.1134/1.1187157

8. Bulyarskii S. V., Grushko N. S., Lakalin A. V. Differential methods for determination of deep-level parameters from recombination currents of *p–n* junctions. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, iss. 10, pp. 1065–1068. https://doi.org/10.1134/1.1187567

9. Gaman V. I. *Physics of semiconductor devices*, study guide. 2nd ed., upd. and rev. Tomsk, Izd-vo nauch.-tekhn. lit. Publ., 2000. 426 p. (In Russian).

10. Benevolensky S. B., Metelkin E. V., Chetverikov N. I., Chetverikova I. F. *Physical principles of operation of semiconductor devices*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 340 p. (In Russian).

The article was submitted 07.12.2023; approved after reviewing 19.02.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Mikhail A. Saurov – PhD student of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the Research Laboratory of Memristive Systems Based on Self-Organized Nanostructures, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), michael15-52@mail.ru

Alexandr V. Lakalin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Development and Research of Micro- and Nanosystems Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119334, Moscow, Leninsky ave., 32A), a.v.lakalin@mail.ru

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

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала
можно оформить на сайтах:

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

Научная статья
УДК 621.382
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-608-615
EDN: AOZPZB

Температурные характеристики шумовых диодов

А. О. Зеневич[1], О. В. Кочергина[1], В. В. Буслюк[2,3], Д. Н. Федосюк[2,3], Д. А. Лущий[2,3]

[1]Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Беларусь
[2]Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь
[3]ОАО «Цветотрон», г. Брест, Беларусь

o.kochergina@bsac.by

Аннотация. Для создания генераторов шума, как правило, используются шумовые диоды. На сегодняшний день зависимость параметров генерируемого шумовым диодом сигнала, его напряжения пробоя, последовательного и дифференциального сопротивления, частоты следования шумовых импульсов от температуры изучена слабо. В работе исследованы кремниевые планарные шумовые диоды моделей ND102L, ND103L и ND104L. С использованием экспериментальной установки выяснено, что рост температуры приводит к увеличению напряжения пробоя исследуемых шумовых диодов. Получены коэффициенты линейности зависимости напряжения пробоя от температуры, равные 2,6; 3,2; 3,0 мВ/К для диодов ND102L, ND103L и ND104L соответственно. Установлено, что наибольшие значения напряжения пробоя характерны для диодов ND102L, а наименьшие – для диодов ND104L во всем диапазоне исследуемых температур. Обнаружено, что повышение температуры приводит к уменьшению последовательного сопротивления. Данная зависимость линейна и наиболее сильно проявляется для диодов ND102L, а наименее – для диодов ND104L. Показано, что дифференциальное сопротивление не зависит от температуры в исследуемом температурном диапазоне. Определено, что наибольшая зависимость напряжения пробоя и частоты следования шумовых импульсов от температуры характерна для диодов ND104L, а наименьшая – для диодов ND102L, наибольшая стабилизация напряжения питания требуется при использовании шумовых диодов ND104L.

Ключевые слова: шумовой диод, температура, напряжение пробоя, дифференциальное сопротивление, частота следования шумовых импульсов

Для цитирования: Температурные характеристики шумовых диодов / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, В. В. Буслюк и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 608–615. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-608-615. – EDN: AOZPZB.

© А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, В. В. Буслюк, Д. Н. Федосюк, Д. А. Лущий, 2024

Original article

Temperature characteristics of noise diodes

***A. O. Zenevich*[1], *O. V. Kochergina*[1], *V. V. Buslyuk*[2,3], *D. N. Fedosyuk*[2,3], *D. A. Luschiy*[2,3]**

[1]*Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus*
[2]*Brest State Technical University, Brest, Belarus*
[3]*JSC "Tsvetotron", Brest, Belarus*

o.kochergina@bsac.by

Abstract. Most commonly noise diodes are used to create noise generators. To this date, the temperature dependence of parameters of signal generated by noise diode, of its breakdown voltage, series and differential resistance, and pulse rate is underexplored. In this work, silicon planar noise diodes of ND102L, ND103L and ND104L models are studied. It has been found using an experimental setup that highest breakdown voltage values are typical for ND102L model and lowest, for ND104L, over the entire range of temperatures studied. It was found that temperature rise leads to decrease in series resistance. This dependency is linear, it is most pronounced for ND102L model and least, for ND104L. It was demonstrated that differential resistance is independent of temperature in the temperature range under study. Study results indicate that the highest dependence of breakdown voltage and noise pulse rate on temperature is specific to ND104L model and the lowest, to ND102L model. It has been established that the greatest supply voltage stabilization is required when using noise diodes of ND104L model.

Keywords: noise diode, temperature, breakdown voltage, differential resistance, pulse rate

For citation: Zenevich A. O., Kochergina O. V., Buslyuk V. V., Fedosyuk D. N., Luschiy D. A. Temperature characteristics of noise diodes. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 608–615. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-608-615. – EDN: AOZPZB.

Введение. Для оценки качества цифровых систем передачи информации, маскирования побочных электромагнитных излучений вычислительной техники, создания криптографических случайных числовых последовательностей в аппаратно-программных комплексах защиты информации требуются генераторы шума [1–7]. Как правило, для создания генераторов шума используются шумовые диоды. При этом большое значение имеют характеристики, описывающие свойства генерируемого сигнала и их зависимость от температуры. Однако в настоящее время зависимость этих параметров от температуры изучена слабо, а по некоторым параметрам характер зависимости не установлен.

Цель настоящей работы – установление зависимости параметров шумовых диодов, таких как напряжение пробоя, последовательное и дифференциальное сопротивление, частота следования шумовых импульсов, от температуры.

Экспериментальная установка и методы измерений. В качестве объектов исследования выбраны кремниевые планарные шумовые диоды производства ОАО «Цветотрон» (Беларусь). Эти диоды хорошо зарекомендовали себя при использовании для

построения генераторов шума [2, 6]. Для проведения исследования случайным образом отобраны по три экземпляра диодов моделей ND102L, ND103L и ND104L. Структурная схема экспериментальной установки для исследования представлена на рис. 1.

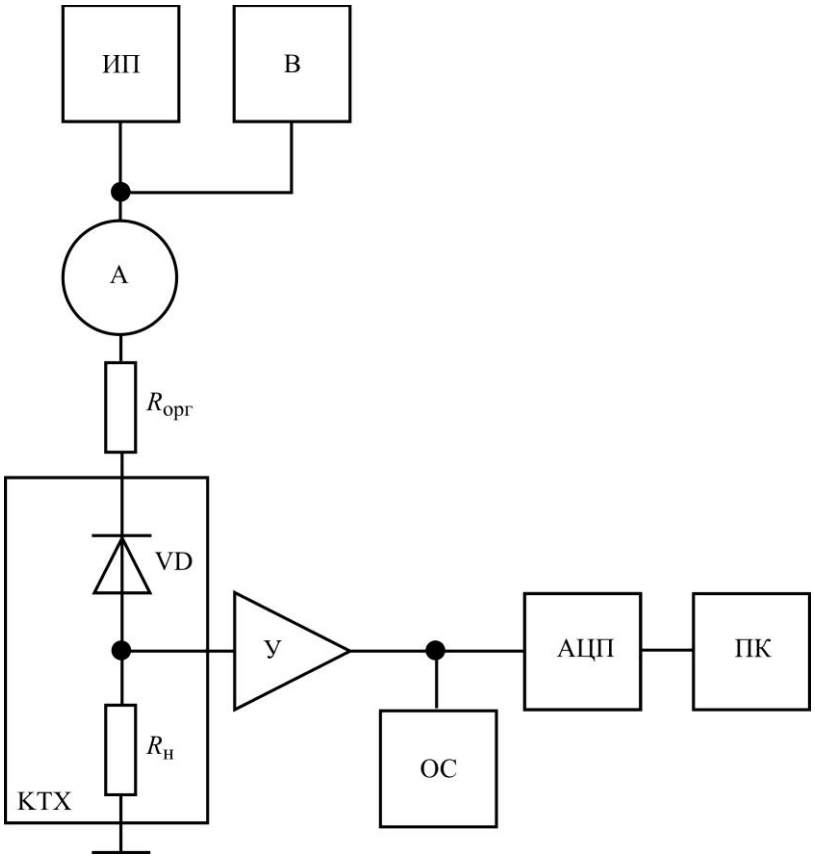


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: ИП – источник питания; В – вольтметр; А – амперметр; $R_{огр}$ – ограничивающий резистор; VD – шумовой диод; $R_н$ – сопротивление нагрузки; КТХ – камера тепла и холода; У – усилитель; ОС – осциллограф; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: ИП – power source; В – voltmeter; А – ammeter; $R_{огр}$ – limiting resistor; VD – noise diode; $R_н$ – load resistance; КТХ – chamber of heat and cold; У – amplifier; ОС – oscilloscope; АЦП – analog-to-digital converter; ПК – personal computer

К шумовому диоду прикладывали напряжение обратного смещения его *p*–*n*-перехода с помощью источника постоянного напряжения в диапазоне 6–11 В. Напряжение питания $U_{пит}$ контролировали вольтметром. Данный диапазон напряжений соответствует рабочему диапазону напряжений исследуемых шумовых диодов. Ток I, протекающий через шумовой диод, определяли амперметром. Для реализации режима микроплазменного пробоя шумовой диод VD включали последовательно с сопротивлением нагрузки $R_{н.}$ Для ограничения тока, протекающего через диод, использовали ограничивающий резистор $R_{огр}$.

В процессе туннелирования или термогенерации образуются свободные носители заряда, которые под воздействием электрического поля получают достаточную энергию для того, чтобы произвести ударную ионизацию и вызвать локальный лавинный пробой *p*–*n*-перехода. В результате пробоя *p*–*n*-перехода ток, протекающий через шумовой диод, резко возрастает. При этом падение напряжения увеличивается на рези-

сторе $R_н$ и уменьшается на диоде. Во время протекания локального пробоя напряжение на шумовом диоде снижается. Соответственно, электрический ток, протекающий через диод, уменьшается и пробой гасится. В результате чего на резисторе $R_н$ формируются шумовые импульсы, которые усиливаются усилителем. Вид сформированных шумовых импульсов контролируется осциллографом. Оцифрованные с помощью АЦП шумовые импульсы подаются на ПК для обработки данных.

Шумовой диод помещали в камеру тепла и холода, позволяющую изменять температуру от 248 до 308 К. Выбранный температурный диапазон обусловлен климатическими условиями эксплуатации исследуемых диодов. Изменение сопротивления $R_н$ в исследуемом диапазоне температур составляет не более 2 % и не приводит к значительному изменению тока, поэтому данные изменения в процессе исследования не учитывали.

Последовательное сопротивление шумовых диодов равно: $R = U_{пит}/I$. Дифференциальное сопротивление определяется по линейному участку ВАХ следующим образом: $R_д = \Delta U/\Delta I$, где ΔU – изменение напряжения, приложенного к шумовому диоду; ΔI – изменение тока, протекающего через шумовой диод. Напряжение пробоя $U_{пр}$ определяется по ВАХ на основании методики, описанной в работе [8]. Поскольку исследуемые шумовые диоды имеют разные напряжения пробоя, то для сравнения их характеристик использовали перенапряжение, определяемое как $\Delta U = U_{пит} - U_{пр}$.

Результаты измерения и их обсуждение. На примере диодов ND102L получены ВАХ при изменении температуры (рис. 2). Видно, что для исследуемых диодов характерна зависимость напряжения пробоя от температуры. Представленные ВАХ являются типовыми и имеют аналогичный вид для всех исследуемых шумовых диодов. Понижение температуры приводит к уменьшению напряжения пробоя для всех исследуемых шумовых диодов. Это объясняется тем, что понижение температуры уменьшает вероятности рассеяния свободных носителей заряда на колебаниях кристаллической решетки шумового диода. В результате этого возрастает вероятность того, что на длине свободного пробега в области лавинного умножения носитель заряда приобретет энергию, необходимую для возникновения пробоя этого диода [8, 9].

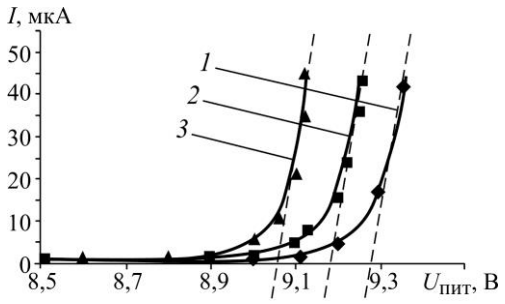


Рис. 2. ВАХ исследуемых шумовых диодов ND102L при изменении температуры: *1* – 308 К; *2* – 278 К; *3* – 248 К

Fig. 2. Current-voltage characteristics of the studied noise diodes ND102L with temperature changes: *1* – 308 K; *2* – 278 K; *3* – 248 K

На рис. 3, *а* представлены зависимости напряжений пробоя шумовых диодов от температуры. Данные зависимости линейные для всех исследуемых шумовых диодов. При анализе зависимостей $U_{пр}(T)$ применяли отношение $\Delta U_{пр}/\Delta T$, где $\Delta U_{пр}$ – изменение напряжения пробоя при изменении температуры ΔT. Тогда $\Delta U_{пр}/\Delta T$ = 2,6; 3,2; 3,0 мВ/К для диодов ND102L, ND103L, ND104L соответственно. Наибольшие значения напряжения пробоя характерны для диодов ND102L, а наименьшие – для диодов ND104L во всем диапазоне исследуемых температур. Наиболее сильная зависимость напряжения пробоя от температуры наблюдается для диодов ND103L, а наименее – для диодов ND102L.

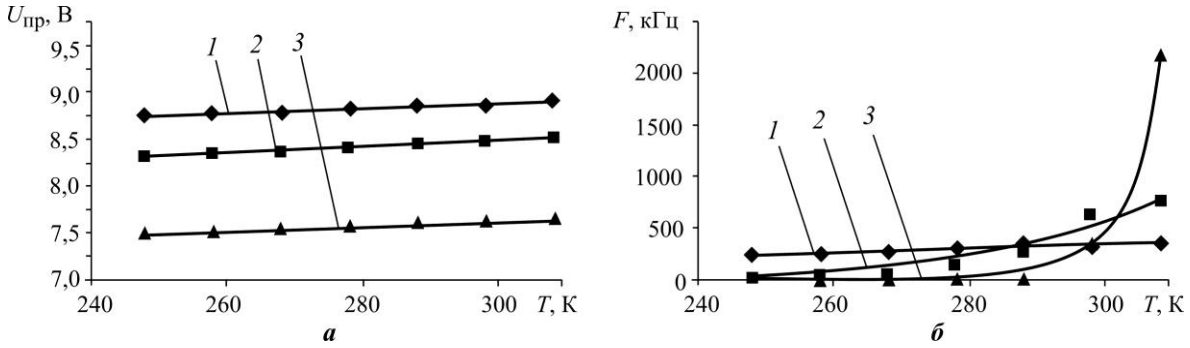


Рис. 3. Зависимости напряжения пробоя диодов (*а*) и частоты следования импульсов (*б*) от температуры: *1* – ND102L; *2* – ND103L; *3* – ND104L

Fig. 3. Dependences of diodes breakdown voltage (*a*) and pulse repetition frequency (*b*) on temperature: *1* – ND102L; *2* – ND103L; *3* – ND104L

При напряжениях питания, превышающих напряжение пробоя, ВАХ имеет линейный участок для всех исследуемых шумовых диодов (см. рис. 2). Для данного участка определяли дифференциальное сопротивление. Так, $R_д$ = 3,1; 1,8; 0,3 кОм для диодов ND102L, ND103L, ND104L соответственно. Дифференциальное сопротивление не зависит от температуры в исследуемом температурном диапазоне. Наименьшее значение дифференциального сопротивления соответствует диодам ND104L, наибольшее – диодам ND102L. Таким образом, более сильная зависимость изменения электрического тока, протекающего через шумовой диод, от нестабильностей приложенного напряжения питания наблюдаются для диодов ND104L. Согласно работе [2] частота следования шумовых импульсов шумового диода напрямую зависит от его тока. Поэтому для поддержания постоянного значения частоты следования шумовых импульсов для диодов ND104L требуется более высокая стабилизация напряжения питания для всех температур из исследуемого температурного диапазона.

На рис. 3, *б* приведена зависимость частоты следования шумовых импульсов от температуры при постоянном перенапряжении $\Delta U = 0$. Для диодов ND102L и ND103L данная зависимость линейна во всем исследуемом температурном диапазоне. При этом частота следования шумовых импульсов увеличивается с ростом температуры. Коэффициент линейности $\Delta F/\Delta T$ для данных шумовых диодов составляет 2,0 и 12,5 кГц/К соответственно. Для других перенапряжений коэффициент линейности $\Delta F/\Delta T$ такой же, как и для $\Delta U = 0$.

Для диодов ND104L при $\Delta U = 0$ частота следования шумовых импульсов также увеличивается с ростом температуры. Линейная зависимость частоты следования шумовых импульсов от температуры для этих шумовых диодов наблюдается в интервале температур 248–280 К, в котором $\Delta F/\Delta T$ = 73,3 кГц/К. При T > 293 К происходит отклонение от линейной зависимости (см. рис. 3, *б*). Такое поведение зависимостей связано с различием их внутренней структуры. Для данных диодов частота следования шумовых импульсов в интервале температур 248–280 К не превышает 100 Гц. Увеличение перенапряжения при этих температурах приводит к увеличению частоты следования шумовых импульсов. Так, при ΔU = 0,1 В значение достигает 10 кГц.

Для диодов ND103L и ND102L при ΔU = 0 в интервале температур 248–280 К наблюдается невысокая частота F следования шумовых импульсов, не превышающая 500 Гц. Добиться увеличения этой частоты в рассматриваемом интервале температур можно путем повышения перенапряжения. Отметим, что при ΔU = 0,1 В параметр F = 25 кГц.

Результаты зависимости параметров исследуемых шумовых диодов от температуры для перенапряжения $\Delta U = 0$ приведены в таблице.

Параметры шумовых диодов при изменении температуры
Parameters of noise diodes with temperature changes

Диод	Температура T, К	Напряжение пробоя $U_{пр}$, В	Сопротивление R, МОм	Частота следования шумовых импульсов, кГц
ND102L	308	9,26	0,63	340
	248	9,07	1,16	220
ND103L	308	8,78	0,93	753
	248	8,54	1,06	0,07
ND104L	308	7,78	2,78	2200
	248	7,58	2,85	0,01

Как следует из данных, представленных в таблице, повышение температуры приводит к уменьшению последовательного сопротивления. Зависимость $R(T)$ носит линейный характер. Коэффициент линейности зависимости $R(T)$ определяется как $k = \Delta R/\Delta T$ (ΔR – изменение последовательного сопротивления при изменении температуры ΔT) и составляет –7,6; –1,9; –1,0 кОм/К для ND102L; ND103L; ND104L соответственно. Зависимость $R(T)$ наиболее сильно проявляется для диодов ND102L и наименее – для диодов ND104L.

Собственная емкость C исследуемых шумовых диодов практически не изменялась в исследуемом температурном диапазоне и составляет 0,5; 1,5; 4,7 пФ для диодов ND102L; ND103L; ND104L соответственно. В связи с этим понижение температуры приводит к увеличению длительности импульсов шумовых диодов. Так, длительность импульсов при перенапряжении $\Delta U = 0$ и температуре $T = 308$ К составляет 1,91; 1,33; 0,44 мкс для диодов ND102L, ND103L, ND104L соответственно. При $T = 248$ К длительность импульсов равна 2,50; 1,74; 0,65 мкс для диодов ND102L, ND103L, ND104L соответственно.

Таким образом, при эксплуатации шумовых диодов ND102L, ND103L и ND104L необходимо учитывать, что наибольшую зависимость частоты следования шумовых импульсов от температуры имеют диоды ND104L, а наименьшую – диоды ND102L.

Заключение. Проведенные исследования показали, что повышение температуры приводит к увеличению напряжения пробоя шумовых диодов моделей ND102L, ND103L и ND104L. Наиболее сильная зависимость напряжения пробоя и частоты следования импульсов от температуры характерна для диодов ND104L. Поэтому для шумовых диодов данной модели необходима большая стабилизация температуры. Наименее сильная зависимость напряжения пробоя и частоты следования импульсов от температуры характерна для диодов ND102L. Следовательно, данная модель менее других нуждается в стабилизации температуры.

Литература

1. Physical parameters of the broadband noise-generator diodes / ***V. V. Buslyuk, V. B. Odzhayev, A. K. Panfilenko et al.*** // Russ. Microelectron. 2020. Vol. 49. Iss. 4. P. 295–301. https://doi.org/10.1134/S1063739720040034

2. ***Горбадей О. Ю., Зеневич А. О.*** Исследование характеристик потока импульсов шумовых диодов, работающих в режиме микроплазменного пробоя // ПФМТ. 2018. № 2 (35). С. 7–10. EDN: LXCQAH.

3. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума / ***В. В. Буслюк, И. Ю. Нерода, А. Н. Петлицкий и др.*** // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 95–99. EDN: YQVMGE.

4. ***Рентюк В.*** Высокоэффективный генератор шума на базе стабилизатора напряжения // Компоненты и технологии. 2014. № 1 (150). С. 136–137. EDN: RRRTUJ.

5. ***Бельский А. Я., Сацук С. М., Путилин В. Н.*** Анализ шумовых характеристик диодного генератора в многоконтурной системе // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18. № 5. С. 9–16. https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-9-16. – EDN: AUGRKM.

6. ***Барановский О. К., Горбадей О. Ю., Зеневич А. О., Сильченко О. М.*** Исследование возможности использования шумовых диодов для генерации пуассоновского потока импульсов // Проблемы инфокоммуникаций. 2017. № 1 (5). С. 13–18. EDN: XSCAOD.

7. ***Горбадей О. Ю., Зеневич А. О.*** Использование диодов-генераторов шума для создания двухуровневой случайной числовой последовательности // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2017. № 3 (56). С. 12–17. EDN: YNNGFV.

8. ***Гулаков И. Р., Зеневич А. О.*** Фотоприемники квантовых систем: монография. Минск: Высш. гос. колледж связи, 2012. 276 с. EDN: POAPCX.

9. ***Буслюк В. В.*** Шумовые полупроводниковые диоды с управляемым уровнем дефектности высоколегированных кремниевых структур: автореф. дис. … канд. техн. наук. Минск, 2022. 23 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 28.12.2023 г.;
принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи (Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2), a.zenevich@bsac.by

Кочергина Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры радио и информационных технологий Белорусской государственной академии связи (Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2), o.kochergina@bsac.by

Буслюк Виктор Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры ЭВМ и систем Брестского государственного технического университета (Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267), ведущий инженер-конструктор ОАО «Цветотрон» (Беларусь, 224022, г. Брест, ул. Суворова, 96А), vbusliuk58@gmail.com

Федосюк Дмитрий Николаевич – магистрант кафедры ЭВМ и систем Брестского государственного технического университета (Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267), инженер ОАО «Цветотрон» (Беларусь, 224022, г. Брест, ул. Суворова, 96А), cvettudf@yandex.by

Лущий Дмитрий Александрович – магистрант кафедры ЭВМ и систем Брестского государственного технического университета (Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267), инженер-технолог ОАО «Цветотрон» (Беларусь, 224022, г. Брест, ул. Суворова, 96А), cvet19ing@gmail.com

References

1. Buslyuk V. V., Odzhayev V. B., Panfilenko A. K., Petlitsky A. N., Prosolovich V. S., Filipyenya V. A., Yankovsky Yu. N. Physical parameters of the broadband noise-generator diodes. *Russ. Microelectron.*, 2020, vol. 49, iss. 4, pp. 295–301. https://doi.org/10.1134/S1063739720040034

2. Gorbadey O. Yu., Zenevich A. O. Investigation of the characteristics of the flow of pulses of noise diodes working in the mode of microplasma breakdown. *PFMT = Problems of Physics, Mathematics and Technics*, 2018, no. 2 (35), pp. 7–10. (In Russian). EDN: LXCQAH.

3. Buslyuk V., Neroda I., Pyatlitski A., Prasalovich U., Yankovski Yu., Lanouski R. Electrophysical parameters of the diodes for broadband noise generation. *Zhurnal Belorus. gos. un-ta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2017, no. 1, pp. 95–99. (In Russian). EDN: YQVMGE.

4. Rentyuk V. Highly efficient noise generator based on a voltage stabilizer. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2014, no. 1 (150), pp. 136–137. (In Russian). EDN: RRRTUJ.

5. Belski A. Ya., Satsyk S. M., Putilin V. N. Analysis of noise characteristics of a diode generator in a multi-circuit system. *Doklady BGUIR*, 2020, vol. 18, no. 5, pp. 9–16. (In Russian). https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-9-16. – EDN: AUGRKM.

6. Baranouski A. K., Gorbadey O. Yu., Zenevich A. O., Silchenko O. M. Research the possibility of use of noise diodes for generation of Poisson point process. *Problemy infokommunikatsiy*, 2017, no. 1 (5), pp. 13–18. (In Russian). EDN: XSCAOD.

7. Gorbadey O. Yu., Zenevich A. O. Use of the diodes-noise generators to create a two-level random numerical sequence. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii = Telecommunication and Information Technologies*, 2017, no. 3 (56), pp. 12–17. (In Russian). EDN: YNNGFV.

8. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of quantum systems*, monograph. Minsk, Higher State College of Communication, 2012. 276 p. (In Russian). EDN: POAPCX.

9. Buslyuk V. V. *Noise semiconductor diodes with a controlled defect level in highly doped silicon structures*, extended abstract of diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Minsk, 2022. 26 p. (In Russian).

The article was submitted 26.12.2023; approved after reviewing 28.12.2023;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Andrey O. Zenevich – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Belarusian State Academy of Communications (Belarus, 220114, Minsk, F. Skorina st., 8/2), a.zenevich@bsac.by

Olga V. Kochergina – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Radio and Information Technologies Department, Belarusian State Academy of Communications (Belarus, 220114, Minsk, F. Skorina st., 8/2), o.kochergina@bsac.by

Viktor V. Buslyuk – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computers and Systems Department, Brest State Technical University (Belarus, 224017, Brest, Moskovskaya st., 267), Leading Design Engineer, JSC “Tsvetotron” (Belarus, 224022, Brest, Suvorov st., 96A), vbusliuk58@gmail.com

Dmitry N. Fedosyuk – Master’s degree student of the Computers and Systems Department, Brest State Technical University (Belarus, 224017, Brest, Moskovskaya st., 267), Engineer, JSC “Tsvetotron” (Belarus, 224022, Brest, Suvorov st., 96A), cvettudf@yandex.by

Dmitry A. Luschiy – Master’s degree student of the Computers and Systems Department, Brest State Technical University (Belarus, 224017, Brest, Moskovskaya st., 267), Process Engineer, JSC “Tsvetotron” (Belarus, 224022, Brest, Suvorov st., 96A), cvet19ing@gmail.com

Уважаемые авторы!

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

Научная статья
УДК 621.382.323
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-616-624
EDN: APTQXV

Нормально-закрытые GaN-транзисторы для комплементарной пары

В. И. Егоркин, О. Б. Чуканова

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

kukhtuaeva@mail.ru

Аннотация. Для решения задач микроминиатюризации и повышения функциональных возможностей приборов на основе гетероструктур AlGaN/GaN необходимо создавать монолитные схемы, содержащие цифровую и аналоговую части, изготовленные на едином кристалле. Наиболее перспективным способом создания нормально-закрытого GaN-транзистора является использование *p*-GaN-затвора. В работе представлены результаты моделирования нормально-закрытых *n*- и *p*-канальных транзисторов на основе GaN-структуры с *p*-GaN эпитаксиальным слоем. Физическая модель нормально-закрытого транзистора с *p*-затвором откалибрована в соответствии с экспериментом. Установлено, что ВАХ смоделированных транзисторов отличаются от ВАХ экспериментальных образцов не более чем на 20 %. Выбрана конструкция *p*-канального транзистора с учетом того, что пороговые напряжения *n*- и *p*-канальных транзисторов для комплементарной пары должны совпадать по модулю –1 В. Показана возможность создания на основе рассматриваемой гетероструктуры комплементарной пары с точкой переключения 2,7 В для монолитных ИС.

Ключевые слова: нормально-закрытый транзистор, GaN, комплементарная пара, TCAD-моделирование, монолитная интегральная схема

Для цитирования: Егоркин В. И., Чуканова О. Б. Нормально-закрытые GaN-транзисторы для комплементарной пары // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 616–624. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-616-624. – EDN: APTQXV

© В. И. Егоркин, О. Б. Чуканова, 2024

Original article

Normally-off GaN *p*-channel transistor for complementary pair

V. I. Egorkin, O. B. Chukanova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

kukhtuaeva@mail.ru

Abstract. In order to solve the microminiaturization problems and to increase capacity of devices based on AlGaN/GaN heterostructures, it is necessary to produce monolithic circuits containing digital and analog parts manufactured on a single chip. The most promising method of a normally-off GaN transistor formation is to use a *p*-GaN gate. In this work, simulation results of normally-off *n*- and *p*-channel transistors based on GaN structure with *p*-GaN epitaxial layer are presented. Physical analog of normally-off transistor with *p* gate was calibrated as required by experiment. It has been established that current-voltage characteristics of simulated transistors differ from current-voltage characteristics of prototype hardware by no more than 20 %. The *p*-channel transistor design has been chosen considering that threshold voltages of the *n*- and *p*-channel transistors for a complementary pair should coincide in modulus –1 V. The possibility is shown to form a complementary pair for monolithic ICs based on the considered heterostructure with switching value 2.7 V.

Keywords: normally-off transistor, GaN, complementary pair, TCAD simulation, monolithic integrated circuit

For citation: Egorkin V. I., Chukanova O. B. Normally-off GaN *p*-channel transistor for complementary pair. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 616–624. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-616-624. – EDN: APTQXV

Введение. HEMT-транзисторы на основе гетероструктур AlGaN/GaN характеризуются малым сопротивлением открытого канала, высокой скоростью переключения, могут работать при высоких температурах и поэтому применяются в качестве высоковольтных мощных ключей и усилителей СВЧ-диапазона [1, 2]. Как правило, такие транзисторы работают в режиме обеднения, т. е. являются нормально-открытыми приборами с *n*-типом носителей. В ряде применений, особенно в высоковольтных системах, более предпочтительны нормально-закрытые транзисторы. Нормально-закрытый режим работы HEMT-транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN обеспечивает безопасную схему включения высоковольтной нагрузки.

В литературе рассматриваются различные способы формирования нормально-закрытого транзистора с носителями *n*-типа на основе GaN-структуры, а именно: утонение барьерного слоя под затвором, при котором потенциал барьера Шоттки, образованного при нанесении металла затвора, вытесняет носители из канала гетероструктуры [3]; утонение барьерного слоя под затвором, при котором происходит внедрение отрицательных ионов фтора, компенсирующих спонтанные поляризационные заряды на гетерогранице, что приводит к обеднению канала носителями [4]; использование *p*-GaN-затвора [5, 6]. Среди перечисленных способов использование

p-затвора наиболее перспективно. Верхним слоем гетероструктуры формируется слой GaN *p*-типа, который приводит к изменению зонной диаграммы таким образом, что происходит обеднение канала. Данный способ обеспечивает контроль порогового напряжения транзистора, а также более высокие значения пробивных напряжений по сравнению с другими методами.

Для решения задач микроминиатюризации и повышения функциональных возможностей приборов на основе GaN-структуры необходимо решить задачу создания монолитных схем, содержащих цифровую и аналоговую части, изготовленных на едином кристалле, в частности разработать комплементарную пару на основе GaN. В последнее время появились публикации о разработке технологии изготовления таких схем [7–10]. Они включают в себя нормально-закрытые *n*-канальные транзисторы с *p*-затвором и нормально-закрытые *p*-канальные транзисторы, изготовленные на основе слоя *p*-затвора. Самый распространенный способ формирования *p*-канального транзистора – утонение *p*-слоя под затвором [10]. В работе [7] описывается формирование *p*-канального транзистора с помощью утонения *p*-слоя в области под затвором и нанесения Al_2O_3 в качестве подзатворного диэлектрика, а также рассматриваются *n*-канальный и *p*-канальный транзисторы на основе одной и той же структуры.

В настоящей работе предлагается GaN-структура со спейсерным AlN-слоем, который уменьшает рассеивание носителей в канале и тем самым способствует увеличению тока стока [11]. Проводится моделирование транзисторов *n*- и *p*-типов по отдельности и в комплементарной паре, находится их точка переключения. Описываются способы увеличения тока стока, так как основной проблемой *p*-канальных транзисторов является малая подвижность носителей заряда в канале, вследствие чего они имеют малые плотности тока стока.

Моделирование нормально-закрытого *n*-канального транзистора. Наиболее востребованными высоковольтными GaN-приборами на сегодняшний день являются *n*-канальные нормально-закрытые транзисторы. Схема их включения гораздо проще и надежнее, чем схема нормально-открытых высоковольтных транзисторов. Кроме того, при использовании таких транзисторов не применяется двуполярное питание. Эпитаксиальные структуры для таких транзисторов выращиваются, как правило, методом металлоорганического химического осаждения из паровой фазы (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD).

Для исследования смоделирована структура со следующим составом (снизу вверх): подложка Si(111); буфер толщиной 3 мкм; нелегированный канальный слой GaN толщиной 300 нм; спейсерный AlN-слой толщиной 1 нм; барьерный слой AlGaN толщиной 15 нм с мольной долей Al, равной 20 %, слой *p*-GaN толщиной 100 нм. Изначально верхний *p*-слой GaN легирован Mg до концентрации порядка $3 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$. Активация примеси в данном слое происходит во время роста пластины в MOCVD-камере в среде N_2 при температуре 750 °C в течение 45 мин. Конечная концентрация активной примеси в *p*-слое 10^{18} см$^{-3}$.

Моделирование транзистора проведено с помощью TCAD на основе решения системы уравнений Пуассона и уравнения токопереноса в рамках диффузионно-дрейфового приближения. Расчет структуры проведен без включения гидродинамической и термодинамической моделей, так как в противном случае ухудшается сходимость решаемой задачи в TCAD. Поэтому для упрощения моделирования расчет проведен при комнатной температуре. Характеристики реальных приборов при таком приближении могут отличаться от результатов моделирования на 5–10 %.

На результат моделирования значительное влияние оказывают граничные условия интерфейсов. В частности, влияет описание интерфейса SiN/AlGaN, т. е. пассивация прибора. В качестве пассивирующего диэлектрика использован SiN, так как он характеризуется отличными адгезионными свойствами к нитридным материалам, устойчив к высоким температурам и более технологичен, чем SiO_2. Существует несколько подходов описания границы раздела SiN/AlGaN, позволяющих учесть суммарный заряд, возникающий за счет поверхностных состояний, спонтанной и пьезоэлектрической поляризаций [12]: учет заряда за счет изменения поляризации на границе раздела SiN/AlGaN; искусственное введение дефектного уровня на границе раздела SiN/AlGaN; введение компенсирующего заряда на границе раздела SiN/AlGaN. Изменение поляризации на границе SiN/AlGaN со стороны поверхности AlGaN приводит к изменению поляризационного заряда и на «зеркальной» поверхности AlGaN, что может привести к неадекватному описанию заряда в канале. Разработчики TCAD в качестве граничного условия на интерфейсе SiN/AlGaN искусственно вводят дефектный уровень. Однако в таком случае увеличивается число неопределенных параметров расчета, а именно тип ловушек – доноры или акцепторы, их концентрация и положение их энергетического уровня в запрещенной зоне. Для простоты расчета интерфейс SiN/AlGaN описан через фиксированный положительный заряд на границе с плотностью N_s. Заряд на интерфейсе может быть не полностью компенсированным, что зависит от технологии нанесения пассивирующего диэлектрика и состава самого диэлектрика. Этот заряд будет определять количество носителей заряда в канале, расчеты которого для рассматриваемой гетероструктуры проведены при разных значениях плотности заряда с помощью решения уравнения Пуассона. Установлено, что при $N_s < 1{,}8 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ канал не образуется, при $N_s = 2{,}7 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ поверхностный заряд на интерфейсе SiN/AlGaN полностью компенсирован, при $N_s = 2{,}9 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ появляется паразитный канал, поэтому для расчетов $N_s = 2{,}7 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$.

Важным аспектом в моделировании является описание контактов. Омические контакты формируют на основе пленок Ti-Al-Ni-Au, а затворы – на основе Ni-Au. Для моделирования значения барьера Шоттки взяты из работы [13], где показаны результаты измерений барьеров Шоттки различных металлов к *n*- и *p*-типу GaN на основе опубликованных экспериментальных данных. Для контактов сток и исток работа выхода из металла составляет 4,3 эВ [12], для затвора – равна 5,2 эВ.

Разработанный технологический маршрут изготовления нормально-закрытого *n*-канального транзистора включает в себя следующие этапы. Сначала формируется межприборная изоляция путем мезатравления или имплантации ионов азота с различной энергией. Затем стравливается слой *p*-GaN в необходимых областях для дальнейшего формирования омических контактов и затворов. Напыляются пленки Ti-Al-Ni-Au (20/100/40/30 нм) электронным лучом для формирования омических контактов и вжигаются в атмосфере азота при температуре 870 °C. Далее напыляются пленки Ni/Au для формирования затворов, пассивируется поверхность прибора, формируется металлизация затвора, межслойная изоляция и металлизация первого и второго уровней.

По разработанному технологическому маршруту изготовлены экспериментальные образцы. На рис. 1 показаны расчетные и экспериментальные ВАХ образцов. Расчетные ВАХ отличаются от экспериментальных не более чем на 20 % при насыщении, т. е. при напряжении на стоке более 4 В. Максимальный ток стока при напряжении на затворе, равном 5 В, составляет около 190 мА/мм. Как показано в [14], наклон ВАХ в линейной части определяется нескомпенсированным зарядом на интерфейсе SiN/AlGaN. Степень компенсации заряда на интерфейсе – неконтролируемая величина на практике, которая влияет на наклон линейной области ВАХ [14]. При верификации модели допу-

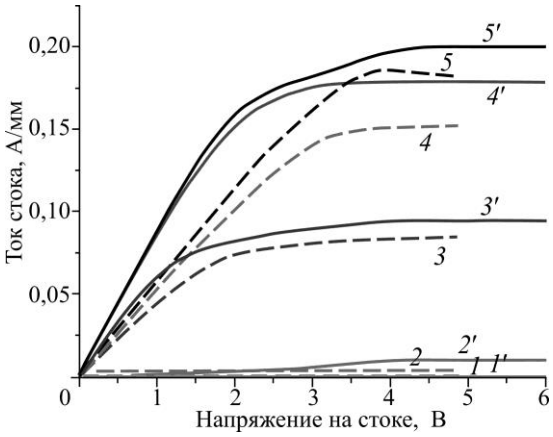


Рис. 1. ВАХ нормально-закрытого *n*-канального транзистора при разном напряжении на затворе: *1*, *1′* – 1 В; *2*, *2′* – 2 В; *3*, *3′* – 3 В; *4*, *4′* – 4 В; *5*, *5′* – 5 В (– – – моделирование; —— эксперимент)

Fig. 1. Current-voltage characteristics of normally-off *n*-channel transistor (– – – simulation result, —— measurements of the experimental sample) at different gate voltage: *1*, *1′* – 1 V; *2*, *2′* – 2 V; *3*, *3′* – 3 V; *4*, *4′* – 4 V; *5*, *5′* – 5 V

стимо, что результат моделирования не полностью совпадает с экспериментом, так как рассматривается идеальный случай пассивации, когда заряд на поверхности AlGaN полностью компенсирован. Длина затвора транзистора составляет 4,4 мкм, расстояние между стоком истоком 20 мкм, ширина транзистора 100 мкм. Пороговое напряжение исследуемого транзистора равно 1 В, что соответствует результатам моделирования. Максимальный ток стока транзистора составляет ~ 180 мА/мм при напряжении на затворе 4 В. При подаче на затвор напряжения более 4 В, т. е. больше ширины запрещенной зоны GaN, появляется ток утечки в затвор (см. рис. 1). Транзистор при таком напряжении на затворе максимально открыт, дальнейшее увеличение напряжения приведет к полной деградации *p*-GaN-затвора.

Моделирование нормально-закрытого *p*-канального транзистора. Моделирование нормально-закрытого *p*-канального транзистора на основе гетероструктуры AlGaN/GaN проводили при условии, что область канала формируется утонением подзатворной области. Но данный способ имеет недостатки: в GaN подвижность дырок слишком мала (~ 15 см^2/В·с при комнатной температуре), утонение подзатворной области приводит к малым токам стока [15, 16].

Для моделирования *p*-канального полевого транзистора выбраны следующие параметры: длина затвора 3 мкм, расстояние между стоком и истоком 12 мкм, омические контакты идеальные. Параметры структуры, а также интерфейсные условия такие же, как и для *n*-канального транзистора. В данном случае неизвестно интерфейсное условие GaN/Al_2O_3. По аналогии с *n*-канальным транзистором рассчитаны зонные диаграммы при различных значениях фиксированного заряда на интерфейсе GaN/Al_2O_3. Идеальной пассивации, т.е. пассивации, при которой получаются плоские зоны, соответствует плотность фиксированного заряда 10^{13} см$^{-2}$. Согласно работе [17] плотность фиксированного заряда на этой границе также составляет 10^{13} см$^{-2}$. Поскольку рассматривается транзистор с диэлектриком под затвором, граничное условие на интерфейсе GaN/Al_2O_3 будет влиять на его пороговое напряжение. Установлено, что при плотности фиксированного заряда, меньшей либо равной 10^{13} см$^{-2}$, транзистор получается нормально-закрытым, а при большей – открытым (рис. 2). Таким образом, пассивация значительно влияет на характеристики прибора.

Основными параметрами, определяющими пороговое напряжение транзистора, являются параметры *p*-слоя – уровень легирования и толщина *p*-слоя под затвором, а также толщина подзатворного диэлектрика. Уровень легирования и толщина *p*-слоя исходной гетероструктуры выбраны с учетом того, что *n*-канальный транзистор, сформированный на ней, должен быть закрыт. Толщина подзатворного диэлектрика и толщина *p*-слоя под затвором выбираются так, чтобы пороговое напряжение *p*-канального транзистора по модулю составляло 1 В, как у *n*-канального транзистора. На рис. 3 показано

влияние толщины подзатворного диэлектрика на пороговое напряжение прибора при толщине *p*-слоя 15 нм. Чем больше толщина подзатворного диэлектрика, тем больше пороговое напряжение по модулю *p*-канального транзистора. Исследовано влияние толщины *p*-слоя под затвором на ток стока при фиксированной толщине подзатворного диэлектрика. Для того чтобы транзистор работал, а не был «наглухо» закрытым, толщина подзатворного диэлектрика должна быть более 12 нм. Таким образом, для *p*-канального транзистора выбраны следующие параметры: толщина *p*-слоя под затвором 15 нм, толщина подзатворного диэлектрика 20 нм.

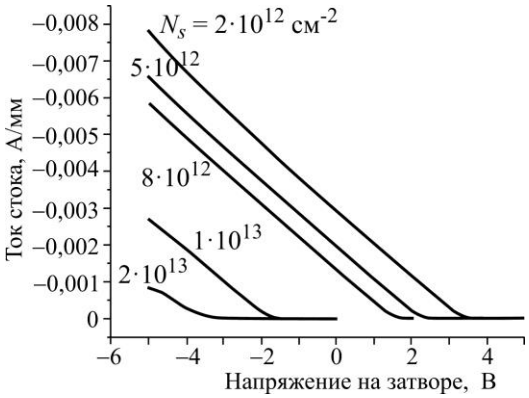


Рис. 2. Проходные характеристики транзистора при различной плотности фиксированного заряда N_s на границе раздела GaN/Al_2O_3

Fig. 2. Transfer characteristics of the transistor at different fixed charge densities N_s at the GaN/Al_2O_3 interface

На рис. 4 показаны ВАХ *p*-канального полевого транзистора. Максимальный ток стока прибора составляет около –20 мА/мм при напряжении на затворе –5 В. Пороговое напряжение прибора составляет около –1 В, что по модулю соответствует пороговому напряжению *n*-канального прибора.

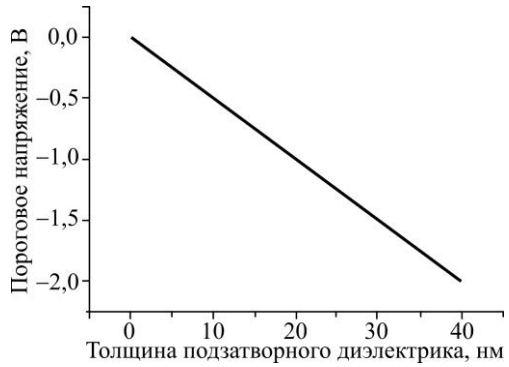


Рис. 3. Зависимость порогового напряжения *p*-канального транзистора от толщины подзатворного диэлектрика

Fig. 3. Dependence of the *p*-channel transistor threshold voltage on the thickness of the gate dielectric

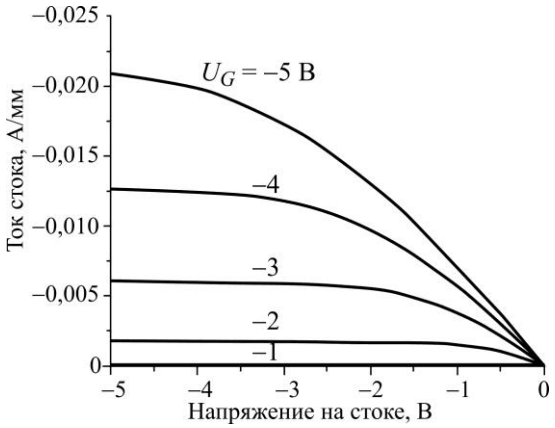


Рис. 4. ВАХ *p*-канального полевого транзистора при разном напряжении на затворе U_G

Fig. 4. Current-voltage characteristics of a *p*-channel field-effect transistor at different gate voltage U_G

Моделирование *n*- и *p*-канальных транзисторов в комплементарной паре. На рис. 5 показаны проходные характеристики *n*- и *p*-канальных приборов в логарифмическом масштабе в комплементарной паре. Видно, что разрабатываемые приборы по уровню порогового напряжения соответствуют друг другу. Определена точка переключения транзисторов в комплементарной паре, равная 2,7 В при напряжении питания 5 В. Эта точка условного равенства токов *n*- и *p*-канальных транзисторов. В идеальном случае напряжение переключения транзисторов должно равняться половине напряжения питания, тогда получаются максимальные помехозащищенность и помехоустойчивость. В рассматриваемом случае при напряжении питания 5 В напряжение переключения транзисторов на 0,2 В больше половины напряжения питания.

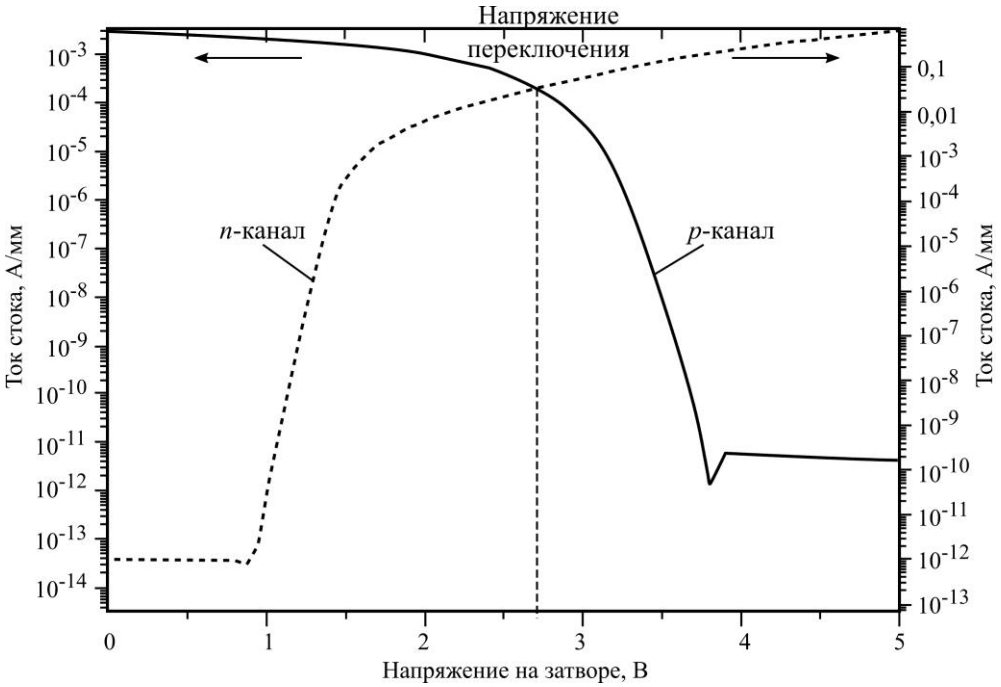


Рис. 5. Проходные характеристики активного и нагрузочного транзисторов в логарифмическом масштабе в комплементарной паре на основе GaN (точка переключения 2,7 В, напряжение питания 5 В)

Fig. 5. Transfer characteristics of active and load transistors on a logarithmic scale in a complementary pair based on GaN (switching point 2.7 V, supply voltage 5 V)

В целях увеличения тока *p*-канального транзистора можно уменьшить размеры *p*-канального транзистора, например сделать расстояние между стоком и истоком 4 мкм и длину затвора 1 мкм. Тогда сопротивление канала уменьшится приблизительно в три раза. Для увеличения тока стока можно подобрать другие параметры толщины *p*-слоя под затвором, например более 15 нм, и толщины подзатворного диэлектрика, используя рассмотренные методы моделирования.

Для формирования *p*-канального транзистора в едином технологическом цикле с *n*-канальным можно использовать разработанный технологический маршрут.

Заключение. В результате моделирования и исследования нормально-закрытых *n*- и *p*-канальных транзисторов на основе GaN-структуры с *p*-GaN эпитаксиальным слоем показано, что они позволяют создавать монолитные ИС, включающие в себя цифровую и аналоговые части, на едином кристалле.

Литература

1. GaN-on-Si power technology: Devices and applications / ***K. J. Chen, O. Häberlen, A. Lidow et al.*** // IEEE Transactions on Electron Devices. 2017. Vol. 64. No. 3. P. 779–795. https://doi.org/10.1109/TED.2017.2657579

2. ***Mishra U. K., Shen L., Kazior T. E., Wu Y.-F.*** GaN based RF power devices and amplifiers // Proceedings of the IEEE. 2008. Vol. 96. No. 2. P. 287–305. https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.911060

3. ***Landford W. B., Tanaka T., Otoki Y., Adesida I.*** Recessed-gate enhancement-mode GaN HEMT with high threshold voltage // Electron. Lett. 2005. Vol. 41. Iss. 7. P. 449–450. https://doi.org/10.1049/el:20050161

4. ***Cai Y., Zhou Y., Lau K. M., Chen K. J.*** Control of threshold voltage of AlGaN/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: From depletion mode to enhancement mode // IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. Vol. 53. Iss. 9. P. 2207–2215. https://doi.org/10.1109/TED.2006.881054

5. ***Roccaforte F., Greco G., Fiorenza P., Iucolano F.*** An overview of normally-off GaN-based high electron mobility transistors // Materials. 2019. Vol. 12. Iss. 10. Art. No. 1599. https://doi.org/10.3390/ma12101599

6. Normally-off *p*-GaN/AlGaN/GaN high electron mobility transistors using hydrogen plasma treatment / ***R. Hao, K. Fu, G. Yu et al.*** // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 109. Iss. 15. Art. No. 152106. https://doi.org/10.1063/1.4964518

7. *P*-channel GaN transistor based on *p*-GaN/AlGaN/GaN on Si / ***N. Chowdhury, J. Lemettinen, Q. Xie et al.*** // IEEE Electron Device Letters. 2019. Vol. 40. No. 7. P. 1036–1039. https://doi.org/10.1109/LED.2019.2916253

8. Gallium nitride-based complementary logic integrated circuits / ***Zh. Zheng, L. Zhang, W. Song et al.*** // Nat. Electron. 2021. Vol. 4. P. 595–603. https://doi.org/10.1038/s41928-021-00611-y

9. Demonstration of GaN integrated half-bridge with on-chip drivers on 200-mm engineered substrates / ***X. Li, K. Geens, W. Guo et al.*** // IEEE Electron Device Letters. 2019. Vol. 40. No. 9. P. 1499–1502. https://doi.org/10.1109/LED.2019.2929417

10. High I_{ON} and I_{ON}/I_{OFF} ratio enhancement-mode buried *p*-channel GaN MOSFETs on *p*-GaN gate power HEMT platform / ***Zh. Zheng, W. Song, L. Zhang et al.*** // IEEE Electron Device Letters. 2020. Vol. 41. No. 1. P. 26–29. https://doi.org/10.1109/LED.2019.2954035

11. The influence of 1 nm AlN interlayer on properties of the $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$/AlN/GaN HEMT structure / ***L. Guo, Xiaol. Wang, C. Wang et al.*** // Microelectron. J. 2008. Vol. 39. Iss. 5. P. 777–781. https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.12.005

12. Sentaurus device user guide: version K-2015.06. Mountain View, CA: Synopsys Inc., 2015. XLVIII, 1446 p.

13. ***Greko G., Iucolano F., Roccaforte F.*** Ohmic contacts to gallium nitride materials // Appl. Surf. Sci. 2016. Vol. 383. P. 324–345. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.016

14. ***Егоркин В. И., Земляков В. Е., Капаев В. В., Кухтяева О. Б.*** Моделирование нормально закрытого HEMT транзистора на основе GaN/AlGaN с *p*-затвором // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 6. С. 474–480. https://doi.org/10.31857/S0544126920060046. – EDN: SYAAWV.

15. High hole mobility *p*-type GaN with low residual hydrogen concentration prepared by pulsed sputtering / ***Y. Arakawa, K. Ueno, A. Kobayashi et al.*** // APL Mater. 2016. Vol. 4. Iss. 8. Art. No. 086103. https://doi.org/10.1063/1.4960485

16. *P*-type gallium nitride by reactive ion-beam molecular beam epitaxy with ion implantation, diffusion, or coevaporation of Mg / ***M. Rubin, N. Newman, J. S. Chan et al.*** // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64. Iss. 1. P. 64–66. https://doi.org/10.1063/1.110870

17. ***Yan Y.*** The investigation of aluminum oxide (Al_2O_3) as gate dielectric in ultra thin body and buried oxide (UTBB) fully depleted (FD) Silicon-on-Insulator (SOI) transistor: MSc (Electr. Eng.) diss. // Digital Master theses [Электронный ресурс]. 2019. URL: http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:22526 (дата обращения: 24.07.2024).

Статья поступила в редакцию 11.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 17.01.2024 г.; принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, начальник Научно-исследовательской лаборатории «Элементная база наноэлектроники» Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), egorkinvi1962@mail.ru

Чуканова Ольга Борисовна – инженер Научно-исследовательской лаборатории «Элементная база наноэлектроники» Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kukhtuaeva@mail.ru

References

1. Chen K. J., Häberlen O., Lidow A., Tsai C.-L., Ueda T., Uemoto Y., Wu Y. GaN-on-Si power technology: Devices and applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, vol. 64, no. 3, pp. 779–795. https://doi.org/10.1109/TED.2017.2657579

2. Mishra U. K., Shen L., Kazior T. E., Wu Y.-F. GaN based RF power devices and amplifiers. *Proceedings of the IEEE*, 2008, vol. 96, no. 2, pp. 287–305. https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.911060

3. Landford W. B., Tanaka T., Otoki Y., Adesida I. Recessed-gate enhancement-mode GaN HEMT with high threshold voltage. *Electron. Lett.*, 2005, vol. 41, iss. 7, pp. 449–450. https://doi.org/10.1049/el:20050161

4. Cai Y., Zhou Y., Lau K. M., Chen K. J. Control of threshold voltage of AlGaN/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: From depletion mode to enhancement mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, vol. 53, iss. 9, pp. 2207–2215. https://doi.org/10.1109/TED.2006.881054

5. Roccaforte F., Greco G., Fiorenza P., Iucolano F. An overview of normally-off GaN-based high electron mobility transistors. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 10, art. no. 1599. https://doi.org/10.3390/ma12101599

6. Hao R., Fu K., Yu G., Li W., Yuan J., Song L., Zhang Zh., Sun Sh. et al. Normally-off *p*-GaN/AlGaN/GaN high electron mobility transistors using hydrogen plasma treatment. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 109, iss. 15, art. no. 152106. https://doi.org/10.1063/1.4964518

7. Chowdhury N., Lemettinen J., Xie Q., Zhang Yu., Rajput N. S., Xiang P., Cheng K., Suihkonen S. et al. *P*-channel GaN transistor based on *p*-GaN/AlGaN/GaN on Si. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, vol. 40, no. 7, pp. 1036–1039. https://doi.org/10.1109/LED.2019.2916253

8. Zheng Zh., Zhang L., Song W., Feng S., Xu H., Sun J., Yang S., Chen T. et al. Gallium nitride-based complementary logic integrated circuits. *Nat. Electron.*, 2021, vol. 4, pp. 595–603. https://doi.org/10.1038/s41928-021-00611-y

9. Li X., Geens K., Guo W., You Sh., Zhao M., Fahle D., Odnoblyudov V., Groeseneken G., Decoutere S. Demonstration of GaN integrated half-bridge with on-chip drivers on 200-mm engineered substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, vol. 40, no. 9, pp. 1499–1502. https://doi.org/10.1109/LED.2019.2929417

10. Zheng Zh., Song W., Zhang L., Yang S., Wei J., Chen K. J. High I_{ON} and I_{ON}/I_{OFF} ratio enhancement-mode buried *p*-channel GaN MOSFETs on *p*-GaN gate power HEMT platform. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 26–29. https://doi.org/10.1109/LED.2019.2954035

11. Guo L., Wang Xiaol., Wang C., Xiao H., Ran J., Luo W., Wang X., Wang B. et al. The influence of 1 nm AlN interlayer on properties of the $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$/AlN/GaN HEMT structure. *Microelectron. J.*, 2008, vol. 39, iss. 5, pp. 777–781. https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.12.005

12. *Sentaurus device user guide*, version K-2015.06. Mountain View, CA, Synopsys Inc., 2015. xlviii, 1446 p.

13. Greko G., Iucolano F., Roccaforte F. Ohmic contacts to gallium nitride materials. *Appl. Surf. Sci.*, 2016, vol. 383, pp. 324–345. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.016

14. Egorkin V. I., Zemlyakov V. E., Kapaev V. V., Kukhtyaeva O. B. Simulation of a normally-off HEMT transistor based on GaN/AlGaN with a *p*-gate. *Russ. Microelectron.*, 2020, vol. 49, pp. 445–451. https://doi.org/10.1134/S1063739720060049

15. Arakawa Y., Ueno K., Kobayashi A., Ohta J., Fujioka H. High hole mobility *p*-type GaN with low residual hydrogen concentration prepared by pulsed sputtering. *APL Mater.*, 2016, vol. 4, iss. 8, art. no. 086103. https://doi.org/10.1063/1.4960485

16. Rubin M., Newman N., Chan J. S., Fu T. C., Ross J. T. *P*-type gallium nitride by reactive ion-beam molecular beam epitaxy with ion implantation, diffusion, or coevaporation of Mg. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, vol. 64, iss. 1, pp. 64–66. https://doi.org/10.1063/1.110870

17. Yan Y. The investigation of aluminum oxide (Al_2O_3) as gate dielectric in ultra thin body and buried oxide (UTBB) fully depleted (FD) Silicon-on-Insulator (SOI) transistor, MSc (Electr. Eng.) diss. *Digital Master theses.* 2019. Available at: http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:22526 (accessed: 24.07.2024).

The article was submitted 11.01.2024; approved after reviewing 17.01.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Vladimir I. Egorkin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific Research Laboratory “Element Base of Nanoelectronics”, Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), egorkinvi1962@mail.ru

Olga B. Chukanova – Engineer of the Scientific Research Laboratory “Element Base of Nanoelectronics”, Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kukhtuaeva@mail.ru

Научная статья
УДК 536.587:537.322
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-625-639
EDN: GIZDIL

Термоэлектрические системы для прецизионного регулирования температуры

Ю. И. Штерн, М. Ю. Штерн, М. С. Рогачев, Я. С. Кожевников

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

m.y.shtern@gmail.com

Аннотация. При создании прецизионных систем регулирования температуры необходимо учитывать множество факторов, которые влияют на функциональные и эксплуатационные характеристики термоэлектрических систем. В работе рассмотрено метрологическое обеспечение для исследования и контроля параметров термоэлектрических материалов, структур и приборов на всех этапах разработки и изготовления термоэлектрических систем. Представлены разработанные и полученные эффективные наноструктурированные материалы на основе BiTeSe и BiSbTe с безразмерной термоэлектрической добротностью 1,16 и 1,24 соответственно. Проведены комплексные исследования данных материалов, определены механизмы электро- и теплопроводности, установлена взаимосвязь между структурой и их параметрами. Разработана технология металл-диэлектрических коммутационных матриц на основе оксидированных сплавов алюминия для термоэлектрических модулей. Определена кинетика роста пористых анодных оксидных пленок на сплавах алюминия. Обоснованы способы формирования и применения материалов контактов в термоэлектрических модулях, удельное контактное сопротивление которых равно 10^{-9} Ом·м^2, а адгезионная прочность составляет до 19 МПа. Разработана технология герметизации термоэлектрических модулей с повышенной надежностью и механической прочностью. Определены и обоснованы критерии проектирования, на основе которых изготовлены источники питания для термоэлектрических систем с низким уровнем пульсаций (0,3 %) и высоким КПД (93 %). Для расчета температуры в электронных термометрах разработаны и подтверждены математические модели, позволяющие определять температуру с точностью до $5 \cdot 10^{-3}$ К. Представленные высокоточные электронные средства измерения температуры, а также прецизионные термоэлектрические термостаты, калибраторы, камеры тепла и холода имеют рабочие температуры от –50 до +60 °С.

Ключевые слова: прецизионная термоэлектрическая система, термоэлектрические материалы, термоэлектрические модули, термоэлектрические приборы

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

© Ю. И. Штерн, М. Ю. Штерн, М. С. Рогачев, Я. С. Кожевников, 2024

Для цитирования: Штерн Ю. И., Штерн М. Ю., Рогачев М. С., Кожевников Я. С. Термоэлектрические системы для прецизионного регулирования температуры // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 625–639. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-625-639. – EDN: GIZDIL.

Original article

Thermoelectric systems for precision temperature control

Yu. I. Shtern, M. Yu. Shtern, M. S. Rogachev, Ya. S. Kozhevnikov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

m.y.shtern@gmail.com

Abstract. Upon creation of precision temperature control systems it is necessary to consider many factors affecting the functional and operational characteristics of thermoelectric systems. In this work, the created metrological assurance for studying and monitoring the parameters of thermoelectric materials, structures and devices at all stages of the development and production of thermoelectric systems is considered. The developed and obtained effective nanostructured materials on the basis of BiTeSe and BiSbTe with dimensionless thermoelectric figure of merit of 1.16 and 1.24, respectively, are presented. Complex studies of these materials were carried out, the mechanisms of electrical and thermal conductivity were determined, and the relationship between their structure and parameters was established. The technology of metal-dielectric commutation matrices based on oxidized aluminum alloys for thermoelectric modules was developed. The kinetics of growth of porous anodic oxide films on aluminum alloys was determined. Connection formation techniques and employed contact materials in thermoelectric modules are substantiated, the specific contact resistance of which is 10^{-9} Ohm·m^2 and the adhesion strength is up to 19 MPa. A technology for sealing thermoelectric modules with increased reliability and mechanical strength was developed. Design criteria were determined and justified, based on which the power supplies for thermoelectric systems were manufactured, having low pulsation level (0.3 %) and high efficiency (93 %). To calculate temperature in electronic thermometers mathematical models allowing the temperature determination within the accuracy of $5 \cdot 10^{-3}$ K have been developed and justified. The presented high-precision electronic temperature measuring instruments, as well as precision thermoelectric thermostats, calibrators, heat and cold chambers have operating temperatures ranging from –50 to +60 °C.

Keywords: precision thermoelectric system, thermoelectric materials, thermoelectric modules, thermoelectric devices

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

For citation: Shtern Yu. I., Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Kozhevnikov Ya. S. Thermoelectric systems for precision temperature control. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 625–639. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-625-639. – EDN: GIZDIL.

Введение. Прецизионное регулирование и стабилизация температуры [1–6] – перспективное направление развития термоэлектричества. Термоэлектрические системы характеризуются уникальной способностью высокоточного регулирования температуры. При создании эффективных термоэлектрических систем важным является метрологическое обеспечение на всех стадиях их разработки и производства. В связи с этим необходимы разработка соответствующих методик и изготовление высокоточных измерительных комплексов. Анализируя современное состояние термоэлектрического материаловедения, следует отметить, что для повышения эффективности термоэлектрических приборов и структур необходимы новые материалы с высокой термоэлектрической добротностью и новые методы их получения [7–12]. Промышленно производимые твердые растворы на основе халькогенидов висмута и сурьмы различных типов проводимости наиболее эффективны для низкотемпературных термоэлектрических систем [8, 9, 13, 14]. При этом основное направление повышения термоэлектрической добротности – снижение теплопроводности с использованием наноструктурированных термоэлектрических материалов [7, 8, 10, 15, 16]. Однако данные материалы практически не реализуются. Связано это с тем, что на сегодняшний день отсутствует полное понимание механизмов теплопроводности, переноса и рассеяния носителей в этих сложных материалах, а также влияния особенностей наноструктуры на стабильность их свойств. Поэтому разработка управляемых процессов получения наноструктурированных термоэлектрических материалов с воспроизводимыми свойствами – важная задача термоэлектрического материаловедения [10].

Цель настоящей работы – разработка физико-технологических основ создания термоэлектрических систем, включающих в себя все стадии производства, начиная от изготовления термоэлектрических материалов и структур на их основе и заканчивая производством оборудования.

Конструкция термоэлектрических модулей. Эффективность термоэлектрических систем зависит от конструкции и технологии изготовления термоэлектрических модулей, в частности от способов получения омических контактов в термоэлементах и коммутационных матриц, а также от технологии герметизации модулей. Контакты в термоэлементах должны иметь низкое удельное сопротивление и высокую адгезионную прочность [17–21]. Перспективно в качестве основы коммутационных матриц использовать металл-диэлектрические подложки с низким термическим сопротивлением и высокой механической прочностью. Такие матрицы позволяют изготавливать термоэлектрические модули, совмещенные с электронными приборами, например гибридными интегральными схемами и многослойными микросборками. Данная конструкция обеспечивает эффективный теплоотвод [22].

Термоэлектрические модули состоят из последовательно соединенных термоэлементов, которые объединяются в открытую электрическую цепь посредством коммутационных матриц. Термоэлектрические модули на эффекте Пельтье в основном работают при температурах, когда неизбежно образование влаги на элементах их конструкции, что отрицательно влияет на срок службы и отказоустойчивость. Кроме того, снижаются технические характеристики модулей. На основании этого необходимо решить вопрос герметизации модулей.

На работу термоэлектрических систем влияет качество источников питания, определяемое пульсациями выходного тока. Отметим, что данная проблема в литературе освещена недостаточно. Основным структурным элементом любой термоэлектрической системы, предназначенной для прецизионного регулирования температуры, являются высокоточные электронные средства измерения температуры. Поэтому необхо-

дима разработка оптимальных математических моделей для расчета температуры, схемотехнических решений для измерения параметров датчиков и аппаратно-программных средств, реализующих созданные математические модели в электронных термометрах [5]. Современное термическое оборудование работает посредством микропроцессорных систем. Однако проблема обратной связи этих систем с контролируемыми объектами мало изучена [4]. Для создания эффективных термоэлектрических систем с прецизионным регулированием температуры необходимы оригинальные конструкторско-технологические решения, обоснованные комплексным подходом в проектировании систем, работающих в условиях термоциклирования.

Методика эксперимента. Структурная схема термоэлектрической системы приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема термоэлектрической системы
Fig. 1. Structural scheme of a thermoelectric system

Основа любой термоэлектрической системы – термоэлемент, определяющий ее эффективность. Термоэлемент образуют установленные на тепловыравнивающих пластинах (теплопроводах) термоэлектрические модули, из которых конструируют одно-

и многокаскадные блоки. В состав термоэлектрического охлаждающего устройства входят: термоэлектрические блоки, теплообменники, устройства принудительной циркуляции теплоносителя (вентиляторы, насосы), датчики температуры, теплоизоляция.

В процессе исследований использовали метрологическое обеспечение, позволяющее контролировать параметры материалов и комплектующих устройств на всех стадиях разработки и производства термоэлектрических систем. Метрологическое обеспечение включает в себя современное аналитическое оборудование, высококлассные измерительные приборы, методики и измерительные комплексы, программное обеспечение для автоматизации процессов измерений и расчета физических параметров. Для исследования состава и структуры термоэлектрических материалов использовали: растровый электронный микроскоп Jeol JSM-6480LV с приставкой для энергодисперсионной спектрометрии IncaDryCool, дифрактометр Bruker D8, оснащенный позиционно-чувствительным детектором LYNXEYE, просвечивающий электронный микроскоп Jeol JEM 2100. Теплоемкость термоэлектрических материалов исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре Netzsch DSC 204 F1 Phoenix. Для исследования температурного коэффициента линейного расширения материалов при температурах выше 300 К использовали дилатометры ULVAC Sinku-Riko DL-1500RH и Linseis DIL L75PT. Для измерения данного коэффициента при температуре 200–450 К авторами настоящей статьи разработаны методика и измерительный комплекс с погрешностью, не превышающей 2 %. Для определения плотности синтезированных термоэлектрических материалов использовали метод гидростатического взвешивания, основанный на законе Архимеда. Концентрацию и подвижность носителей заряда материалов определяли с помощью метода, основанного на измерении эффекта Холла на установке Ecopia HMS-5000. Измерение микротвердости по Виккерсу проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3М. Адгезионную прочность контактных систем определяли методом прямого отрыва по оригинальной методике с использованием датчика Force Gauge PCE-FM50. Погрешность измерения адгезии пленок составляет не более 10 %.

Термоэлектрические параметры материалов устанавливали на измерительных комплексах с погрешностями электропроводности и термоЭДС – 3 %, теплопроводности 5 % [23]. Исследование удельного контактного сопротивления в структуре контактная система – полупроводник с чувствительностью до 10^{-10} Ом·м^2 проводили по методике, описанной в работе [17]. Также разработаны методики и аппаратно-программные комплексы для исследования влияния параметров и режимов питания на характеристики термоэлектрических устройств, исследования и калибровки средств измерения температуры, исследования функциональных и эксплуатационных характеристик приборов и устройств, входящих в структуру термоэлектрической системы [4, 5].

Результаты и их обсуждение. В наноструктурированных материалах дополнительно к рассеянию фононов на атомах замещения в твердых растворах происходит их рассеяние на кристаллитах, размеры которых соизмеримы с длиной свободного пробега фононов и составляют от 10 до 100 нм и которые определяют основной вклад в процесс переноса тепловой энергии (25–55 %) [7, 10]. При этом указанные размеры кристаллитов практически не рассеивают носители зарядов. Таким образом, управляя размерами структурных дефектов кристаллической решетки в наноструктурированных материалах, можно добиться эффективного рассеяния фононов.

Технология наноструктурированных термоэлектрических материалов включает в себя их синтез, последующее измельчение с получением нанодисперсного порошка, затем искровое плазменное спекание порошков. Разработаны составы и получены эффек-

тивные наноструктурированные материалы на основе BiTeSe, BiSbTe. Установлено влияние режимов получения наноструктурированных материалов на состав, структуру и термоэлектрические параметры [10]. Искровое плазменное спекание позволяет достигать плотность материала 98–99 % от теоретически возможной [10, 24]. Проведены исследования структуры, состава и свойств полученных материалов. Определены параметры решетки, установлено соответствие составов полученных материалов их составам после синтеза. Распределение элементов в термоэлектрических материалах однородно, образцы однофазные. Установлены размеры кристаллитов в наноструктурированных материалах [10]. Плотность наноструктурированных материалов составила 7,60 и 6,65 г/см^3 для BiTeSe и BiSbTe соответственно. Концентрация носителей и их подвижность соответственно равны $3{,}12\cdot10^{19}$ см$^{-3}$ и 232 см^2/(В·с) для BiTeSe и $3{,}37\cdot10^{19}$ см$^{-3}$ и 203 см^2/(В·с) для BiSbTe. Микротвердость, измеренная по методу Виккерса, составила 33,5 и 44,4 для BiTeSe и BiSbTe соответственно. Экспериментальные значения удельной теплоемкости для различных составов в интервале температур 300–600 К изменялись незначительно в области значений 0,20 Дж/(г·К) ± 10 %.

Проведены исследования термоэлектрических параметров и рассчитана безразмерная термоэлектрическая добротность *ZT* наноструктурированных материалов $Bi_2Te_{2,8}Se_{0,2}$ (0,16 масс. % $CdCl_2$) и $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ (2,2 мас. % Te и 0,16 масс. % TeI_4), полученных из порошков с разной дисперсностью, определяемой временем помола, равным 20, 40, 60 мин (рис. 2). Результаты на рис. 2 приведены в сравнении с данными для термоэлектрических материалов одинакового состава, полученных зонной плавкой, позволяющей добиться максимальной эффективности поликристаллических термоэлектрических материалов [10, 23].

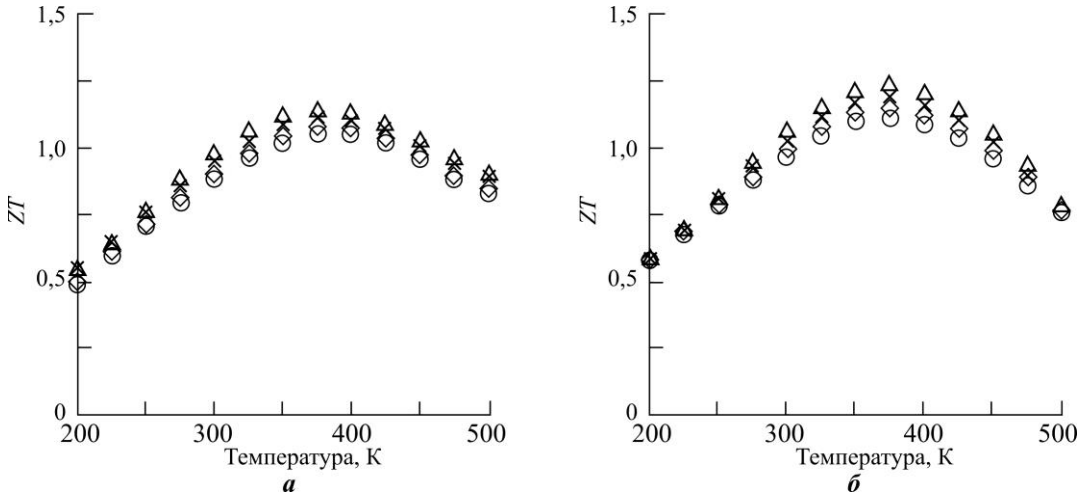


Рис. 2. Температурная зависимость *ZT* для BiTeSe (*а*) и BiSbTe (*б*), полученных из порошков с разным временем помола: ◊ – 20 мин, × – 40 мин, Δ – 60 мин; ○ – зонная плавка
Fig. 2. Temperature dependence *ZT* for BiTeSe (*a*) and BiSbTe (*b*) obtained from powders with different grinding times: ◊ – 20 min, × – 40 min, Δ – 60 min; ○ – zone melting

На основании проведенного сравнительного анализа результатов комплексных исследований структуры, состава и физико-химических свойств термоэлектрических материалов установлена взаимосвязь между структурой и свойствами наноструктурированных материалов. У наноструктурированных материалов за счет снижения теплопроводности от 12 до 25 % при незначительном снижении электропроводности, не пре-

вышающем 1–4 %, параметр *ZT* по сравнению с термоэлектрическими материалами, полученными зонной плавкой, увеличивается от 10 до 24 % [10].

Для изготовления металл-диэлектрических коммутационных матриц использовали подложки алюминиевых сплавов АМц-2М и АМг-3М со сформированными электрохимическим способом пористыми анодными оксидными пленками (АОП). Электрохимическое оксидирование проводили в гальваностатическом режиме в щавелевокислом электролите при плотностях тока 1,5–2,0 А/дм^2. Установлена кинетика роста АОП в зависимости от времени оксидирования τ (рис. 3, *а*). Следует отметить смещение границы раздела металл – оксид, что приводит к изменению толщины металл-диэлектрической подложки. Как видно из диаграммы (см. рис. 3, *а*), граница раздела металл – оксид перемещается в глубь подложки. На рис. 3, *б* представлены результаты исследований ВАХ АОП, полученных при плотности тока 2 А/дм^2. Из рисунка видно, что пробой оксидной пленки толщиной 3 мкм наступает при 200 В, пленки толщиной 8 мкм – при 580 В, а пленок 15 и 25 мкм – при 800 и 1000 В соответственно.

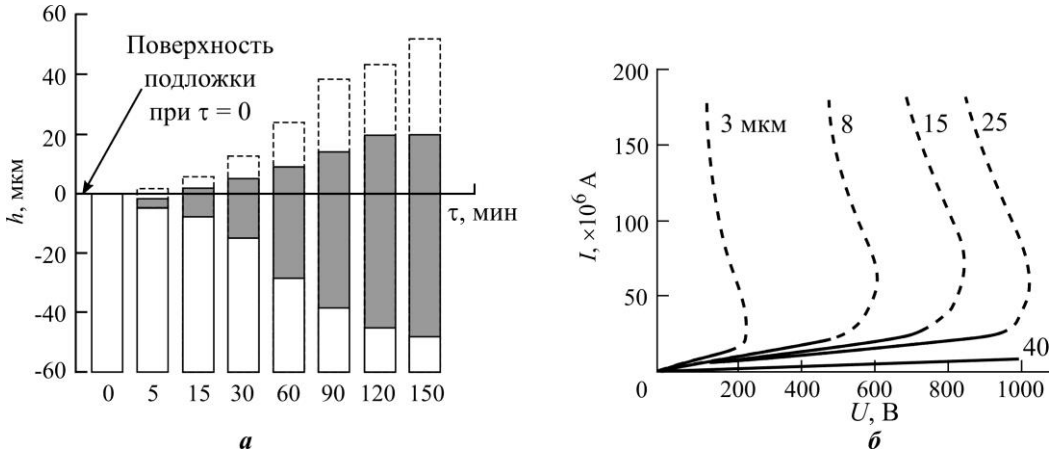


Рис. 3. Диаграмма роста АОП при плотности тока 2,0 А/дм^2 (*а*) и ВАХ АОП разной толщины (*б*)

Fig. 3. Growth diagram of anodic oxide film at a current density of 2.0 A/dm^2 (*a*) and volt-ampere characteristics of AOFs with various thicknesses (*b*)

Плотность пор в АОП составляла 10^9–10^{10} пор/см^2, объем равен 36 % объема АОП. Наличие пор в оксидном слое оказывает положительное влияние на механическую прочность системы АОП – металлическая подложка, так как поры выполняют роль демпфера и компенсируют термические напряжения, возникающие из-за существенной разности температурного коэффициента линейного расширения Al ($26\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$) и Al_2O_3 ($7\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$). Испытания в режиме многократного термоциклирования в интервале температур 170–700 К показали, что полученные металл-диэлектрические подложки не деформируются [22]. Коммутационные элементы на металл-диэлектрических подложках формировали магнетронным напылением меди. Адгезионный подслой выполнен из ванадия. Получена высокая адгезионная прочность металлических пленок (до 25 МПа).

Формирование контактов к термоэлектрическим материалам проводили магнетронным напылением и электронно-лучевым испарением никеля. Установлено, что на границе контакта образуются интерметаллические соединения никеля с компонентами термоэлектрического материала. Образование химических связей на начальной стадии формирования пленки способствует увеличению адгезии. Получены омические контак-

ты с удельным сопротивлением ~ 10^{-9} Ом·м^2 и адгезионной прочностью не менее 18,7 МПа [17].

Для увеличения надежности термоэлектрических модулей, особенно в изделиях специального назначения, разработан способ герметизации их термоэлементов, позволяющий осуществлять эксплуатацию модулей при температурах от –60 до +80 °С в условиях влажности до 95 %. Способ включает в себя две стадии: защитное покрытие ветвей термоэлементов лаком УР-231 и герметизация термоэлектрического модуля герметиком ВГО-1.

Одна из причин возникновения эффекта Пельтье – постоянный ток, пропускаемый через термоэлемент. Тепло Пельтье Q_P пропорционально постоянной составляющей тока. Тепло Джоуля Q_J, пропорциональное квадрату силы тока, негативно влияет на холодопроизводительность термоэлемента Q_0. В связи с этим в определенных условиях теплообмена при достижении некоторого значения тока дальнейшее его увеличение приводит к снижению эффект охлаждения.

Тепловой баланс термоэлемента рассчитывается следующим образом:

$$Q_0 = Q_P - Q_J - Q_F,$$

где Q_F – тепло Фурье, определяемое тепловым потоком от горячего спая к холодному за счет разности температур.

Пульсации в токе питания термоэлемента не влияют на значение Q_P, они увеличивают только Q_J. При этом потери холодопроизводительности от периодических пульсаций за период, равный 2π/ω, определяются по формуле

$$\Delta Q_0 = \frac{R_{te} I_{\text{const}}^2 A_p \pi}{2\omega},$$

где R_{te} – электрическое сопротивление ветвей термоэлемента; I_{const} – постоянная составляющая тока; A_p – уровень пульсаций тока; ω – частота пульсаций.

Для устранения негативного влияния пульсаций на эффективность работы термоэлектрического модуля предложены критерии построения источников питания постоянного тока для прецизионных термоэлектрических систем, которые реализованы при создании импульсных регулируемых источников питания мощностью 800 и 1000 Вт, имеющих низкий уровень пульсации (0,3 %) и высокий КПД (87–93 %).

В процессе разработки термоэлектрических систем при комплексном подходе к решению задач измерения температуры созданы электронные средства измерения с высокой точностью [5], в которых использованы оригинальные схемотехнические решения. Проведены исследования разработанных датчиков температуры, в результате которых оптимизированы математические модели, реализованные с помощью разработанного программного обеспечения. Количество вычислительных операций в математической модели определяет быстродействие средства измерения, поэтому необходимо использование минимального количества преобразований при сохранении требуемой точности. При измерении температуры с помощью платинового тонкопленочного терморезистора в интервале температур от –60 до +200 °С с абсолютной погрешностью ±0,2 °С применяется следующая математическая модель:

$$t = \frac{W + a}{bW + c},$$

где $W = R_t/R_0$; R_t – сопротивление при температуре t; R_0 – сопротивление при 0 °С; a, b, c – постоянные коэффициенты, которые определяются по ГОСТ Р 8.625-2006.

Представленная модель также используется в беспроводных интеллектуальных датчиках с погрешностью измерения ± 0,02 °С в интервале температур 5–95 °С. Заявленная погрешность достигается за счет уменьшения измеряемого интервала температур и индивидуальной калибровки датчика. Измеренные значения температуры передаются по радиоканалу с несущими частотами сигнала 433 или 868 МГц.

Для средств измерения температуры с высокой точностью (до $5 \cdot 10^{-3}$ °С) предложена и обоснована следующая математическая модель:

$$t = \frac{a_0 + a_1 W + a_2 W^2 + W^3}{b_0 + b_1 W + b_2 W^2},$$

где a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2 – постоянные коэффициенты используемого чувствительного элемента, определяемые по стандартным значениям в ГОСТ Р 8.625-2006.

Реализуя предложенную модель в средствах измерения температуры с чувствительными элементами на основе платины, требуемая погрешность достигается в интервале температур от –100 до +600 °С [5].

Характеристики любого оборудования для контроля и стабилизации температуры в основном определяются математическими моделями и средствами, которые реализуют данные модели. С ростом точности стабилизации температуры предъявляются повышенные требования к алгоритмам и системам управления, что особенно актуально для прецизионных термоэлектрических систем, где точность стабилизации температуры составляет сотые доли градуса. В связи с этим для оптимизации процесса стабилизации заданной температуры использовали усовершенствованный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор мощности и оригинальную математическую модель управления термоэлектрической системой [4]. Эту модель в совокупности с программным обеспечением и оригинальными схемотехническими решениями применяли во всех микропроцессорных блоках, разработанных для управления термоэлектрической системой. На рис. 4 представлена диаграмма изменения стабилизируемой температуры термоэлектрической системы при различной температуре окружающей среды $T^{\text{окр}}$. Задержка реакции микропроцессорной системы $\tau_з$ на изменение внешних факторов при использовании пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора приводит к разбалансу стабилизируемой температуры. Как видно из графика, изменение температуры окружающей среды приводит к снижению температуры теплообменников, что влияет на точность стабилизации температуры. Использование усовершенствованной математической модели позволяет снизить $\tau_з$, в результате чего увеличивается точность стабилизации температуры до 0,1 °С [4].

Разработанные физико-технологические основы использованы при создании термоэлектрических систем для прецизионного регулирования и стабилизации температуры: термоэлектрических камер тепла и холода ТЭК-50/60; термостатов НТТ-50/60 и калибраторов КТ-10/60 с рабочими температурами от –75 до +60 °С. На рис. 5 представлены структурные схемы конструкции термоэлектрических калибратора КТ-10/60 и термостата НТТ-50/60.

Рабочая камера термоэлектрического калибратора и термостата изготовлена из меди. В калибраторе в камере размещается измерительная ячейка из меди, содержащая каналы для установки исследуемых датчиков температуры. На корпусе рабочей камеры установлены однокаскадные (в калибраторе) или двухкаскадные (в термостате) термоэлектрические батареи. Отвод тепла с горячего спая термоэлектрической батареи осуществляется с помощью воздушных (в калибраторе) или жидкостных (в термостате) теплообменников. Рабочая камера размещается в корпусе с теплоизоляцией, в которой

имеется источник питания, электронный термометр и микропроцессорная система с тактильной клавиатурой для программирования режимов работы оборудования. В таблице приведены технические характеристики термоэлектрического оборудования.

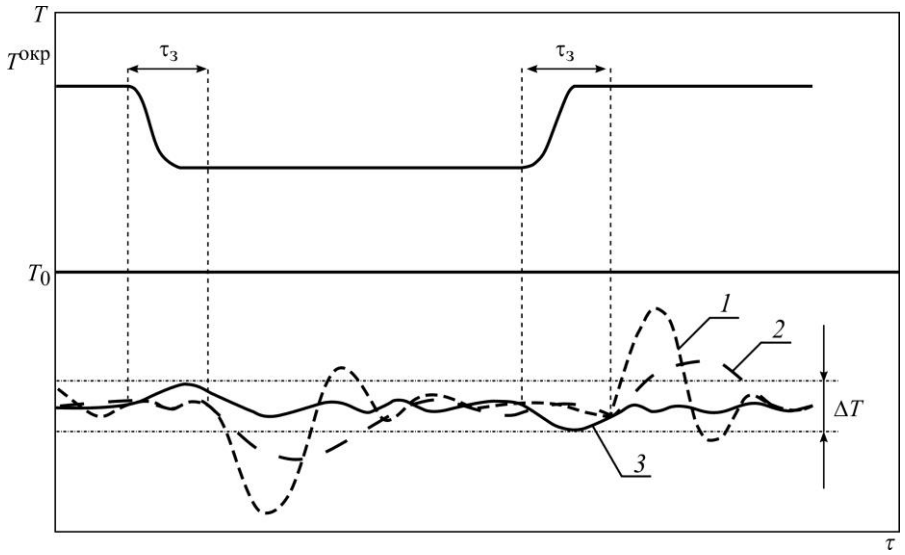


Рис. 4. Динамика изменения стабилизируемой температуры термоэлектрической системы: *1* – снижение температуры теплообменников; *2* – стабилизация температуры; *3* – увеличенная точность стабилизации температуры до 0,1 °C

Fig. 4. Dynamics of changes in the stabilized temperature of the thermoelectric system: *1* – decrease in the temperature of heat exchangers; *2* – temperature stabilization; *3* – increased accuracy of temperature stabilization to 0.1 °C

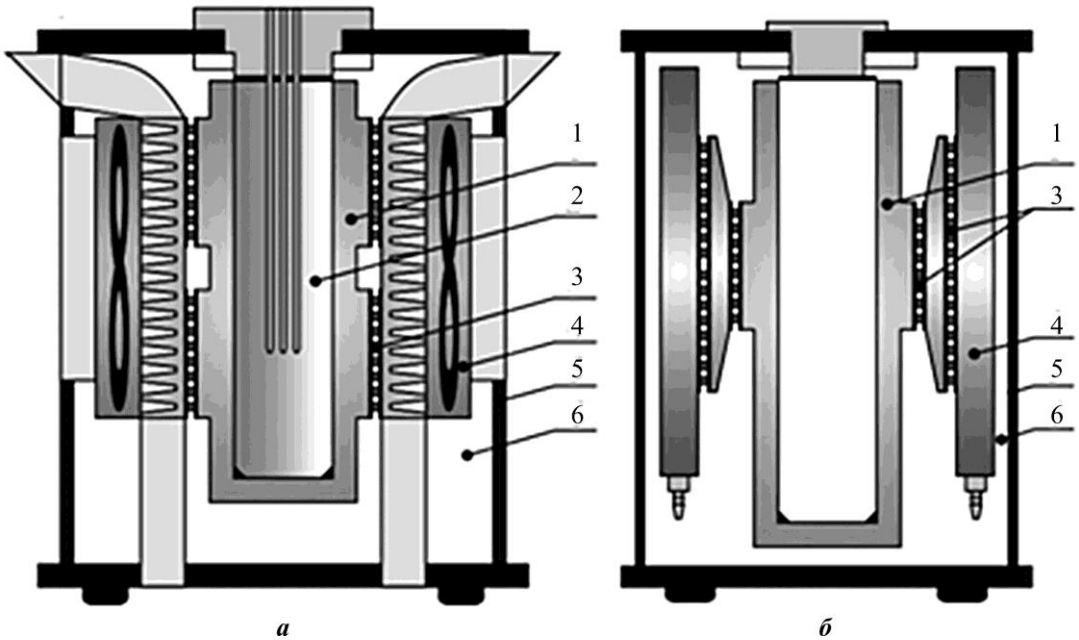


Рис. 5. Структурные схемы калибратора КТ-10/60 (*а*) и термостата НТТ-50/60 (*б*): 1 – рабочая камера; 2 – измерительная ячейка; 3 – термоэлектрические батареи; 4 – теплообменник; 5 – корпус рабочей камеры; 6 – теплоизоляция

Fig. 5. Block diagrams of the KT-10/60 calibrator (a) and the NTT-50/60 thermostat (b): 1 – working chamber; 2 – measuring cell; 3 – thermoelectric batteries; 4 – heat exchanger; 5 – the body of the working chamber; 6 – thermal insulation

Технические характеристики термоэлектрического оборудования
Technical characteristics of thermoelectric equipment

Параметр	Калибратор КТ-10/60	Термостат НТТ-50/60	Камера тепла и холода ТЭК-50/60
Интервал рабочих температур, °С	от –20 до +60	от –50 до +60	от –50 до +60
Дискретность установки температуры, °С	± 1	± 1	± 1
Точность стабилизации температуры, °С	± 0,1	± 0,2	± 0,2
Максимальный градиент температуры в рабочей зоне, °С/мм	0,001	0,002	0,002
Рабочий объем, $см^3$	12	27	60
Потребляемая мощность, Вт	750	750	800

Примечание: интерфейс связи с ПК – USB/RS-232.

Заключение. Разработанные физико-технологические основы создания прецизионных термоэлектрических систем позволяют улучшить их функциональные и эксплуатационные характеристики, а также расширить области применения таких систем. Созданное метрологическое обеспечение дает возможность проводить исследования и контролировать параметры материалов и приборов на всех стадиях разработки и производства. Безразмерная термоэлектрическая добротность ZT полученных наноструктурированных материалов на основе BiTeSe, BiSbTe равна 1,16 и 1,24 соответственно. Разработанные металл-диэлектрические коммутационные матрицы для термоэлектрических модулей на основе оксидированных сплавов алюминия выдерживают колебания температуры от –100 до +430 °С. Полученные омические контакты к термоэлектрическим материалам имеют удельное сопротивление, не превышающее 10^{-9} Ом·$м^2$, и высокую адгезионную прочность (до 19 МПа). Предложенная технология герметизации термоэлектрических модулей повышает их надежность и механическую прочность. Определенные и обоснованные критерии проектирования источников питания для термоэлектрических систем реализованы при создании регулируемых импульсных источников питания различной мощности, обладающих низким уровнем пульсаций (не более 0,3 %) и высоким КПД (до 93 %). Используемые математические модели для различных средств измерения температуры позволяют рассчитывать температуру с точностью до $5 \cdot 10^{-3}$ °С.

Представленная технология позволила создать высокоточные электронные средства измерения температуры. С помощью разработанных микропроцессорных блоков управления прецизионными термоэлектрическими системами возможно стабилизировать температуру с точностью ± 0,2 °С. Изготовленные прецизионные термостат, калибратор, камера тепла и холода позволяют стабилизировать температуру в рабочих объемах с погрешностью, не превышающей ± 0,1 °С в интервале температур от –50 до +60 °С. При этом в рабочем объеме обеспечивается однородный профиль температуры на уровне 0,001 °С/мм.

Литература

1. ***Salah W. A., Abuhelwa M.*** Review of thermoelectric cooling devices recent applications // JESTEC. 2020. Vol. 15. No. 1. P. 455–476.

2. ***Zaferani S. H., Sams M. W., Ghomashchi R., Chen Z.-G.*** Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: Design, optimization, and advancement // Nano Energy. 2021. Vol. 90 (A). Art. ID: 106572. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106572

3. ***Siddique A. R. M., Venkateshwar K., Mahmud S., Heyst B. van.*** Performance analysis of bismuth-antimony-telluride-selenium alloy-based trapezoidal-shaped thermoelectric pallet for a cooling application // Energy Convers. Manag. 2020. Vol. 222. Art. ID: 113245. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113245

4. Разработка математических моделей для интеллектуальных систем управления прецизионным термическим оборудованием / ***Ю. И. Штерн, Я. С. Кожевников, В. М. Рыков и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 2 (82). С. 52–59. EDN: LMCYMD.

5. ***Штерн Ю. И., Кожевников Я. С., Рыков В. М., Миронов Р. Е.*** Математические модели и аппаратно-программные средства для высокоточных электронных измерителей температуры // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 1 (99). С. 10–17. EDN: PWUTDF.

6. Theoretical and experimental investigations of thermoelectric refrigeration box used for medical service / ***R.-R. He, H.-Y. Zhong, Y. Cai et al.*** // Procedia Engineering. 2017. Vol. 205. P. 1215–1222. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.356

7. Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials / ***Z. Ma, J. Wei, P. Song et al.*** // Mater. Sci. Semicond. Process. 2021. Vol. 121. Art. ID: 105303. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105303

8. Compromise and synergy in high-efficiency thermoelectric materials / ***T. Zhu, Y. Liu, C. Fu et al.*** // Adv. Mater. 2017. Vol. 29. Iss. 14. Art. ID: 1605884. https://doi.org/10.1002/adma.201605884

9. Современное состояние термоэлектрического материаловедения и поиск новых эффективных материалов / ***А. А. Шерченков, Ю. И. Штерн, Р. Е. Миронов и др.*** // Российские нанотехнологии. 2015. Т. 10. № 11-12. С. 22–32. EDN: VBTZWL.

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

11. A review on fundamentals, design and optimization to high zT of thermoelectric materials for application to thermoelectric technology / ***A. Kumar, S. Bano, B. Govind et al.*** // J. Electron. Mater. 2021. Vol. 50. P. 6037–6059. https://doi.org/10.1007/s11664-021-09153-7

12. Processing of advanced thermoelectric materials / ***J. Li, Y. Pan, C. Wu et al.*** // Sci. China Technol. Sci. 2017. Vol. 60. P. 1347–1364. https://doi.org/10.1007/s11431-017-9058-8

13. A review on recent developments of thermoelectric materials for room-temperature applications / ***Z. Soleimani, S. Zoras, B. Ceranic et al.*** // Sustainable Energy Technol. Assess. 2020. Vol. 37. Art. ID: 100604. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100604

14. ***Cai B., Hu H., Zhuang H.-L., Li J.-F.*** Promising materials for thermoelectric applications // J. Alloys Compd. 2019. Vol. 806. P. 471–486. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.147

15. ***Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G.*** Advanced thermoelectric design: From materials and structures to devices // Chem. Rev. 2020. Vol. 120. Iss. 15. P. 7399–7515. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00026

16. Recent advances in inorganic material thermoelectrics / ***P. Ren, Y. Liu, J. He et al.*** // Inorg. Chem. Front. 2018. Vol. 5. Iss. 10. P. 2380–2398. https://doi.org/10.1039/C8QI00366A

17. Thin-film contact systems for thermocouples operating in a wide temperature range / ***M. Shtern, M. Rogachev, Yu. Shtern et al.*** // J. Alloys Compd. 2021. Vol. 852. Art. ID: 156889. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156889

18. Pulsed-light surface annealing for low contact resistance interfaces between metal electrodes and bismuth telluride thermoelectric materials / ***G. Joshi, D. Mitchell, J. Ruedin et al.*** // J. Mater. Chem. C. 2019. Vol. 7. Iss. 3. P. 479–483. https://doi.org/10.1039/C8TC03147A

19. Electrical contact uniformity and surface oxidation of ternary chalcogenide alloys / ***P. A. Sharma, M. Brumbach, D. P. Adams et al.*** // AIP Advances. 2019. Vol. 9. Iss. 1. Art. No. 015125. https://doi.org/10.1063/1.5081818

20. ***Liu W., Bai S.*** Thermoelectric interface materials: A perspective to the challenge of thermoelectric power generation module // J. Materiomics. 2019. Vol. 5. Iss. 3. P. 321–336. https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.04.004

21. ***Semenyuk V.*** Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers // J. Electron. Mater. 2019. Vol. 48. Iss. 4. P. 1870–1876. https://doi.org/10.1007/s11664-018-6785-5

22. ***Штерн Ю. И.*** Технология получения и исследование пористых оксидных пленок на сплавах алюминия // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81. № 4. С. 546–550. EDN: JSBCRR.

23. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements / ***M. Shtern, M. Rogachev, Yu. Shtern et al.*** // J. Alloys Compd. 2021. Vol. 877. Art. ID: 160328. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328

24. ***Han J.-K., Shin D.-W., Madavali B., Hong S.-J.*** Investigation of spark plasma sintering temperature on microstructure and thermoelectric properties of *p*-type Bi-Sb-Te alloys // J. Powder Mater. 2017. Vol. 24 (2). P. 115–121. https://doi.org/10.4150/KPMI.2017.24.2.115

Статья поступила в редакцию 09.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.02.2024 г.;
принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Штерн Юрий Исаакович – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), hptt@miee.ru

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

Рогачев Максим Сергеевич – кандидат технических наук, ассистент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), rmaks1988@yahoo.com

Кожевников Яков Серафимович – кандидат технических наук, ведущий инженер Научно-технологического центра фотошаблонов Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yacovk@yandex.ru

References

1. Salah W. A., Abuhelwa M. Review of thermoelectric cooling devices recent applications. *JESTEC,* 2020, vol. 15, no. 1, pp. 455–476.

2. Zaferani S. H., Sams M. W., Ghomashchi R., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: Design, optimization, and advancement. *Nano Energy,* 2021, vol. 90 (A), art. ID: 106572. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106572

3. Siddique A. R. M., Venkateshwar K., Mahmud S., Heyst B. van. Performance analysis of bismuth-antimony-telluride-selenium alloy-based trapezoidal-shaped thermoelectric pallet for a cooling application. *Energy Convers. Manag.,* 2020, vol. 222, art. ID: 113245. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113245

4. Shtern Yu. I., Kozhevnikov J. S., Rykov V. M., Mironov R. E., Shtern M. Yu. Development of mathematical models for intellectual monitoring systems of precise thermal equipment. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics,* 2010, no. 2 (82), pp. 52–59. (In Russian). EDN: LMCYMD.

5. Shtern Yu. I., Kozhevnikov Ya. S., Rykov V. M., Mironov R. E. Mathematical models and hardware & software for highly accurate electronic temperature meters. *Russ. Microelectron.,* 2013, vol. 42, iss. 7, pp. 384–388. https://doi.org/10.1134/S1063739713070093

6. He R.-R., Zhong H.-Y., Cai Y., Liu D., Zhao F.-Y. Theoretical and experimental investigations of thermoelectric refrigeration box used for medical service. *Procedia Engineering,* 2017, vol. 205, pp. 1215–1222. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.356

7. Ma Z., Wei J., Song P., Zhang M., Yang L., Ma J., Liu W., Yang F., Wang X. Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2021, vol. 121, art. ID: 105303. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105303

8. Zhu T., Liu Y., Fu C., Heremans J. P., Snyder J. G., Zhao X. Compromise and synergy in high-efficiency thermoelectric materials. *Adv. Mater.*, 2017, vol. 29, iss. 14, art. ID: 1605884. https://doi.org/10.1002/adma.201605884

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

10. Shtern M. Yu. Nanostructured thermoelectric materials for temperatures of 200–1200 K obtained by spark plasma sintering. *Semiconductors*, 2022, vol. 56, iss. 13, pp. 437–443. https://doi.org/10.1134/S1063782622130152

11. Kumar A., Bano S., Govind B., Bhardwaj A., Bhatt K., Misra D. K. A review on fundamentals, design and optimization to high zT of thermoelectric materials for application to thermoelectric technology. *J. Electron. Mater.*, 2021, vol. 50, pp. 6037–6059. https://doi.org/10.1007/s11664-021-09153-7

12. Li J., Pan Y., Wu C., Sun F., Wei T. Processing of advanced thermoelectric materials. *Sci. China Technol. Sci.*, 2017, vol. 60, pp. 1347–1364. https://doi.org/10.1007/s11431-017-9058-8

13. Soleimani Z., Zoras S., Ceranic B., Shahzad S., Cui Y. A review on recent developments of thermoelectric materials for room-temperature applications. *Sustainable Energy Technol. Assess.*, 2020, vol. 37, art. ID: 100604. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100604

14. Cai B., Hu H., Zhuang H.-L., Li J.-F. Promising materials for thermoelectric applications. *J. Alloys Compd*, 2019, vol. 806, pp. 471–486. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.147

15. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: From materials and structures to devices. *Chem. Rev.*, 2020, vol. 120, iss. 15, pp. 7399–7515. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00026

16. Ren P., Liu Y., He J., Lv T., Gao J., Xu G. Recent advances in inorganic material thermoelectric. *Inorg. Chem. Front.*, 2018, vol. 5, iss. 10, pp. 2380–2398. https://doi.org/10.1039/C8QI00366A

17. Shtern M., Rogachev M., Shtern Yu., Gromov D., Kozlov A., Karavaev I. Thin-film contact systems for thermocouples operating in a wide temperature range. *J. Alloys Compd*, 2021, vol. 852, art. ID: 156889. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156889

18. Joshi G., Mitchell D., Ruedin J., Hoover K., Guzman R., McAleer M., Wood L., Savoy S. Pulsed-light surface annealing for low contact resistance interfaces between metal electrodes and bismuth telluride thermoelectric materials. *J. Mater. Chem. C*, 2019, vol. 7, iss. 3, pp. 479–483. https://doi.org/10.1039/C8TC03147A

19. Sharma P. A., Brumbach M., Adams D. P., Ihlefeld J. F., Lima-Sharma A. L., Chou S., Sugar J. D., Lu P. et al. Electrical contact uniformity and surface oxidation of ternary chalcogenide alloys. *AIP Advances*, 2019, vol. 9, iss. 1, art. no. 015125. https://doi.org/10.1063/1.5081818

20. Liu W., Bai S. Thermoelectric interface materials: A perspective to the challenge of thermoelectric power generation module. *J. Materiomics*, 2019, vol. 5, iss. 3, pp. 321–336. https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.04.004

21. Semenyuk V. Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers. *J. Electron. Mater.*, 2019, vol. 48, iss. 4, pp. 1870–1876. https://doi.org/10.1007/s11664-018-6785-5

22. Shtern Yu. I. Technology of fabrication and study of porous oxide films on aluminum alloys. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2008, vol. 81, iss. 4, pp. 585–587. https://doi.org/10.1134/S1070427208040022

23. Shtern M., Rogachev M., Shtern Yu., Sherchenkov A., Babich A., Korchagin E., Nikulin D. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements. *J. Alloys Compd*, 2021, vol. 877, art. ID: 160328. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328

24. Han J.-K., Shin D.-W., Madavali B., Hong S.-J. Investigation of spark plasma sintering temperature on microstructure and thermoelectric properties of *p*-type Bi-Sb-Te alloys. *J. Powder Mater.*, 2017, vol. 24 (2), pp. 115–121. https://doi.org/10.4150/KPMI.2017.24.2.115

The article was submitted 09.02.2024; approved after reviewing 20.02.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Yuri I. Shtern – 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), hptt@miee.ru

Maxim Yu. Shtern – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), m.y.shtern@gmail.com

Maxim S. Rogachev – Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), rmaks1988@yahoo.com

Yacov S. Kozhevnikov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of the Scientific and Technological Center of Photomasks, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yacovk@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): https://www.ural-press.ru/catalog
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- **через Агентство** «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- **ООО «Руспресса»**: http://abcpress.ru/
- **ООО «ГЛОБАЛПРЕСС»**: globalpress.ms@mail.ru
- **подписное агентство** «Криэйтив Сервис Бэнд»: https://periodicals.ru/
- **редакцию** – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

Научная статья
УДК 621.375.024:621.382.3:544.54
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-640-657
EDN: GIGWRQ

Анализ влияния радиационных эффектов на характеристики операционного усилителя с использованием универсальной SPICE-RAD-модели биполярных транзисторов

К. О. Петросянц[1,3], М. В. Кожухов[1], Д. А. Попов[1], И. А. Харитонов[1], С. В. Корнеев[2], П. А. Дюканов[2], Д. С. Смирнов[2], Э. Н. Вологдин[2]

[1]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия
[2]АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия
[3]Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия

kpetrosyants@hse.ru

Аннотация. Операционные усилители широко используются в электронных системах, к которым предъявляются требования по стойкости к воздействию ионизирующих излучений. В связи с этим у разработчика ИС возникает необходимость проводить схемотехническое моделирование с учетом радиационных факторов. Основной проблемой этого метода моделирования операционных усилителей является отсутствие в SPICE-подобных программах адекватных моделей биполярных транзисторов, учитывающих влияние разных видов излучения. Существующие SPICE-модели биполярных транзисторов позволяют учитывать влияние гамма-квантов и нейтронов и имеют ряд недостатков. В работе представлены модели операционных усилителей, реализованные на транзисторном уровне. Для схемотехнического моделирования операционных усилителей с учетом радиационных эффектов предложена универсальная SPICE-RAD-модель, адекватно описывающая характеристики биполярных транзисторов до и после воздействия различных видов радиации. Представлены результаты моделирования основных электрических характеристик двух типов операционных усилителей (аналоги AD829, uA741) до и после воздействия ионизирующего излучения в диапазоне доз до 2 Мрад и в диапазоне мощностей доз 0,1–50 рад/с. Разница между экспериментальными и смоделированными характеристиками операционных усилителей составляет не более 20 %.

© К. О. Петросянц, М. В. Кожухов, Д. А. Попов, И. А. Харитонов, С. В. Корнеев, П. А. Дюканов, Д. С. Смирнов, Э. Н. Вологдин, 2024

Ключевые слова: операционные усилители, биполярные транзисторы, SPICE-модели, SPICE-моделирование, радиационные излучения, мощность дозы излучений

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-22-00313).

Для цитирования: Анализ влияния радиационных эффектов на характеристики операционного усилителя с использованием универсальной SPICE-RAD-модели биполярных транзисторов / К. О. Петросянц, М. В. Кожухов, Д. А. Попов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 640–657. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-640-657. – EDN: GIGWRQ.

Original article

Analysis of radiation exposure effects on the characteristics of an operational amplifier using the universal SPICE-RAD model of bipolar transistors

K. O. Petrosyants[1,3], M. V. Kozhukhov[1], D. A. Popov[1], I. A. Kharitonov[1], S. V. Korneev[2], P. A. Dukanov[2], D. S. Smirnov[2], E. N. Vologdin[2]

[1]National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
[2]"NPP Pulsar" JSC, Moscow, Russia
[3]Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

kpetrosyants@hse.ru

Abstract. The operational amplifiers (Op-Amps) are widely used in electronic systems operating under conditions of exposure to ionizing radiation; hence the IC designer has a need to carry out circuit modeling considering radiation factors. The main problem of this method of the Op-Amps simulation is that in SPICE-like programs there are no adequate models of bipolar transistors (BJTs) considering the effect of different types of radiation. The existing BJT SPICE models only allow the consideration of gamma-quantum and neutrons effects and have several disadvantages. In this work, the Op-Amp simulations implemented at transistor level are presented. For circuit simulation of the Op-Amps with account for radiation effects a universal SPICE-RAD model has been proposed, which adequately describes the BJT characteristics before and after exposure to various types of radiation. Simulation results of main electrical characteristics of two types of the Op-Amps (analogues of AD829, uA741) before and after exposure to ionizing radiation in the dose range up to 2 Mrad and the dose-rate range 0.1–50 rad/s are presented. The difference between the experimental and simulated Op-Amp characteristics is no more than 20 %.

Keywords: operational amplifiers, Op-Amps, bipolar transistors, BJTs, SPICE models, SPICE simulation, radiations, dose rate

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-22-00313).

For citation: Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V., Popov D. A., Kharitonov I. A., Korneev S. V., Dukanov P. A., Smirnov D. S., Vologdin E. N. Analysis of radiation exposure effects on the characteristics of an operational amplifier using the universal SPICE-RAD model of bipolar transistors. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 640–657. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-640-657. – EDN: GIGWRQ.

Введение. Операционные усилители (ОУ) широко используются в электронных системах, включая бортовую аппаратуру космических аппаратов, которая подвергается воздействию ионизирующих излучений. Поэтому схемотехническое моделирование электрических характеристик ИС необходимо проводить с учетом радиационных эффектов. Для этой цели используются два метода моделирования: на транзисторном уровне [1, 2] или на поведенческом уровне [3, 4].

Моделирование на транзисторном уровне позволяет, во-первых, выполнять анализ радиационной стойкости ОУ и выявлять наиболее «слабые» компоненты, характеристики которых деградируют в наибольшей степени, во-вторых, в случае необходимости применять дополнительные схемотехнические решения для повышения радиационной стойкости ОУ. Поэтому модели ОУ на транзисторном уровне наиболее эффективны для оптимизации схем и повышения их радиационной стойкости. Основная проблема этого подхода – отсутствие в SPICE-подобных программах схемотехнического анализа адекватных моделей биполярных транзисторов (БТ), учитывающих влияние разных видов излучения.

Модели ОУ поведенческого типа – альтернативный подход к описанию ОУ, когда электрическая схема ОУ заменяется макромоделью в виде многополюсника. Характеристики генераторов тока и напряжения многополюсника описываются математическими зависимостями. Данный подход позволяет с достаточной точностью моделировать внешние электрические характеристики реального ОУ со стороны входа и выхода микросхемы. При этом не требуется тестовых структур отдельных БТ, а также электрической схемы ОУ. Поведенческая модель ОУ позволяет существенно сократить время моделирования, что используется, как правило, на системном уровне моделирования аппаратуры, на котором ОУ рассматривается как самостоятельный электронный компонент.

В настоящей работе исследуется модель ОУ, представленная на транзисторном уровне. Для учета радиационных эффектов предлагается универсальная SPICE-RAD-модель, которая адекватно описывает характеристики Si БТ и SiGe гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ), подвергнутых воздействию различных видов радиации: гамма-квантов, электронов, нейтронов и протонов. Модель включена в распространенные версии SPICE-подобных программ и в значительной степени позволяет снять ограничения, имеющие место при моделировании радиационно стойких биполярных ИС.

Универсальная SPICE-RAD-модель БТ. Компактные SPICE-модели БТ, учитывающие влияние гамма-квантов и нейтронов, описаны в работах [1, 2, 5–9]. Каждая из моделей имеет свою оригинальную эквивалентную схему, систему уравнений и набор параметров. Для определения параметров требуются специальные измерения и методики пересчета, которые существенным образом отличаются от общепринятых для экстракции SPICE-параметров необлученных транзисторов. Кроме того, существенный недостаток этих моделей в том, что они не учитывают повышенную деградацию электрических характеристик транзистора при облучении с малой мощностью дозы – эффекты ELDRS (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity) [10–13]. Эти недостатки ограни-

чивают возможности практического применения существующих моделей разработчиками ИС.

Разработана универсальная SPICE-RAD-модель Si БТ и SiGe ГБТ для различных типов ионизирующих излучений [14]. Обобщенная эквивалентная схема модели приведена на рис. 1.

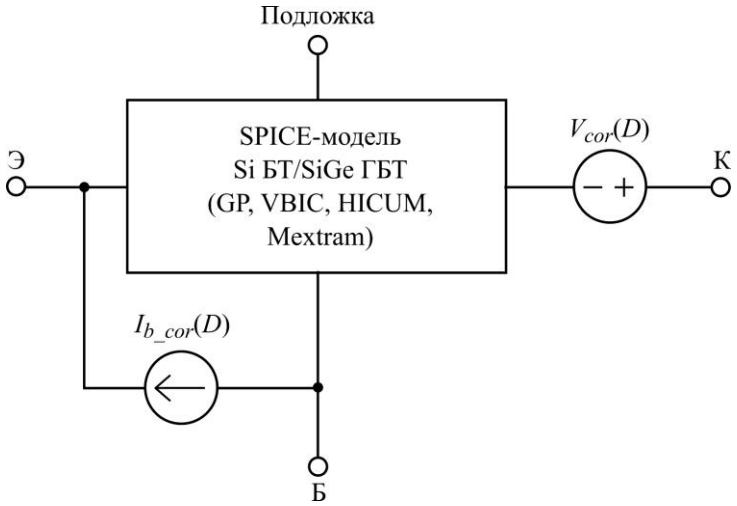


Рис. 1. Обобщенная эквивалентная схема SPICE-RAD-модели БТ
Fig. 1. Unified equivalent circuit of the bipolar transistor SPICE-RAD model

Универсальная SPICE-RAD-модель БТ состоит из ядра, описываемого стандартной моделью GP, VBIC, HICUM, MEXTRAM (тип модели выбирает разработчик), и дополнительной подсхемы, учитывающей радиационно-индуцированные сдвиги токов и напряжений, в том числи и эффекты ELDRS.

Источник тока $I_{b_cor}(D)$ учитывает деградацию тока базы после облучения и состоит из двух составляющих: объемной $I_{bulk}(D)$ и поверхностной $I_{surf}(D)$. Источник напряжения $V_{cor}(D)$ описывает сдвиг напряжения коллектор – эмиттер $U_{КЭ}$ в областях насыщения и пробоя. Универсальная SPICE-RAD-модель является общей для различных видов ионизирующих излучений (гамма-кванты, электроны, нейтроны, протоны) и имеет один и тот же набор уравнений и параметров. В зависимости от вида воздействия меняются только численные значения тех параметров модели, которые учитывают радиационное воздействие.

Компоненты схемы SPICE-RAD-модели БТ описываются следующими уравнениями:

– источник тока $I_{b_cor}(D)$ учитывает увеличение тока базы после облучения и состоит из

$$I_{bulk}(D) = I_{sd}\left(1+K_d D\right)\left(e^{\frac{U_{БЭ}}{n_{ed}V_t}}-1\right), \quad (1)$$

$$I_{surf}(D) = I_{ss\,max}\left(1-e^{-K_s D}\right)\left(e^{\frac{U_{БЭ}}{n_{ed}V_t}}-1\right), \quad (2)$$

где I_{sd}, K_d, n_{ed}, $I_{ss\,max}$, K_s, n_{es} – коэффициенты; D – доза или поток; $U_{БЭ}$ – напряжение база – эмиттер; V_T – температурный потенциал;

– источник напряжения $V_{cor}(D)$ учитывает сдвиги напряжения коллектор – эмиттер в областях насыщения и пробоя:

$$V_{cor}(D) = \left(V_0 + g \cdot e^{-hD}\right)\left(1 - e^{\frac{U_{КЭ}}{aV_t}}\right), \tag{3}$$

где V_0, g, h, a – коэффициенты; $U_{КЭ}$ – напряжение коллектор – эмиттер.

Для учета влияния радиации на напряжение пробоя необходимо выбрать в качестве ядра VBIC-модель, которая содержится в библиотеках всех SPICE-подобных программ. В VBIC-модель включены дополнительные выражения для параметров *AVC*1 и *AVC*2, описывающих зависимость напряжения лавинного пробоя от общей дозы или интегрального потока:

$$AVC1(D) = AVC1(0)\left(1 + K_{AVC1}D\right), \tag{4}$$

$$AVC2(D) = AVC2(0)\left(1 + K_{AVC2}D\right), \tag{5}$$

где *AVC*1(0), *AVC*2(0) – параметры VBIC-модели, определяющие напряжения лавинного пробоя до облучения; K_{AVC1}, K_{AVC2} – коэффициенты.

Следует учитывать, что облучение с малыми мощностями дозы приводит к более сильной деградации тока базы БТ. Это отрицательно влияет на электрические характеристики ОУ. На рис. 2 представлена зависимость радиационно-индуцированного тока базы БТ от мощности дозы излучения [10].

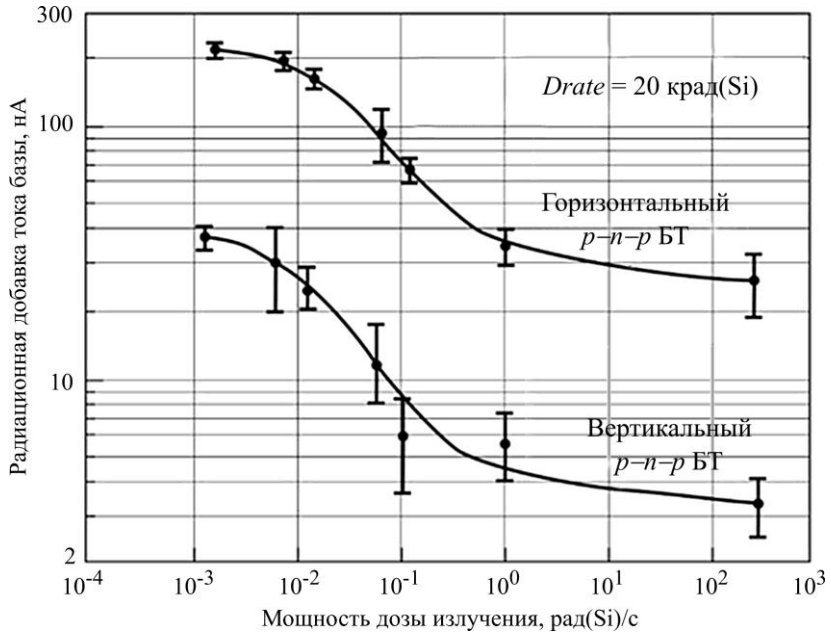


Рис. 2. Зависимость радиационной добавки тока базы от мощности дозы излучения
Fig. 2. Dependence of base current degradation on radiation dose rate

Для моделирования повышенной деградации тока базы БТ при облучении с низкой мощностью дозы в SPICE-RAD-модель для тока $I_{surf}(D)$, входящего в состав источника тока $I_{b_cor}(D)$, добавлена функция $K_{ELDRS}(Drate)$, которая позволяет учесть увеличение радиационной добавки тока базы при уменьшении мощности дозы излучения:

$$I_{surf}^{\text{ELDRS}}(D, Drate) = K_{\text{ELDRS}}\left(Drate\right) I_{surf}(D), \quad (6)$$

$$K_{\text{ELDRS}}\left(Drate\right) = E + L \cdot \exp(-Drate^{R} S), \quad (7)$$

где *Drate* – мощность дозы излучения; *E*, *L*, *R*, *S* – коэффициенты.

SPICE-RAD-модель проверена на транзисторах, изготовленных по различным технологиям Si/SiGe БТ/ГБТ [15]. Пример моделирования электрических характеристик приведен на рис. 3 для коммерческих SiGe ГБТ с шириной эмиттера 0,25 мкм, изготовленного по технологии БиКМОП SGB25V фирмы IHP. Облучение образцов SGB25V при воздействии электронов и гамма-квантов проведено в пассивном режиме с закороченными выводами.

Значения параметров SPICE-RAD-модели для SiGe ГБТ (SGB25V) после облучения гамма-квантами и электронами следующие [15]:

Масштабный ток переноса IS ..... $2{,}08 \cdot 10^{-15}$ А
Коэффициент неидеальности для прямого включения NF 1,035
Прямой коэффициент усиления по току BF 290
Обратный коэффициент усиления по току BR 0,7
Обратный ток перехода база – эмиттер ISE ..... $6{,}00 \cdot 10^{-20}$ А
Коэффициент неидеальности для перехода база – эмиттер NE 1,05
Прямое напряжение Эрли VAF ..... 345 В
Ток начала спада коэффициента BF при больших токах IKF ..... 0,35 А
Ток начала спада коэффициента BR при больших токах IKR ..... $1{,}07 \cdot 10^{-4}$ А
Обратный ток перехода база – коллектор ISC ..... $2{,}56 \cdot 10^{-14}$ А
Ток при среднем значении RB IRB ..... $1{,}00 \cdot 10^{-6}$ А
Коэффициент неидеальности для перехода база – коллектор NC 2
Сопротивление эмиттера RE ..... 0,2 Ом
Сопротивление базы RB ..... 54,4 Ом
Минимальное сопротивление базы при большом токе RBM ..... 6,67 Ом
Сопротивление коллектора RC ..... 9,6 Ом

Значения радиационно-зависимых коэффициентов макромодели:

	Гамма-излучение	**Электронное излучение**
I_{sd}	$9 \cdot 10^{-17}$ А	$6 \cdot 10^{-18}$ А
n_{ed}	1,6	2,1
$I_{ss\,max}$	$3 \cdot 10^{-9}$ А	$1{,}25 \cdot 10^{-12}$ А
K_s	$1 \cdot 10^{-7}$ рад$^{-1}$	$2{,}6 \cdot 10^{-15}$ см^2
K_d	$9{,}6 \cdot 10^{-5}$ рад$^{-1}$	$1{,}9 \cdot 10^{-10}$ см^2
n_{es}	5,3	1,81

Методика экстракции параметров SPICE-RAD-модели представляет собой модификацию стандартной процедуры, основанную на результатах измерения совокупности электрических характеристик необлученных и облученных БТ. Методика экстракции параметров включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Выбрать ядро SPICE-RAD-модели БТ (GP, VBIC, HICUM, MEXTRAM).

Шаг 2. Определить параметры ядра SPICE-RAD-модели необлученного БТ с использованием стандартных процедур, в том числе пакетов программ IC-CAP или BSIMPROPlus, и результатов измерения ВАХ, C-V- и f_T-характеристик.

Шаг 3. Выбрать набор основных радиационно-зависимых параметров SPICE-RAD-модели, которые необходимо учитывать при моделировании.

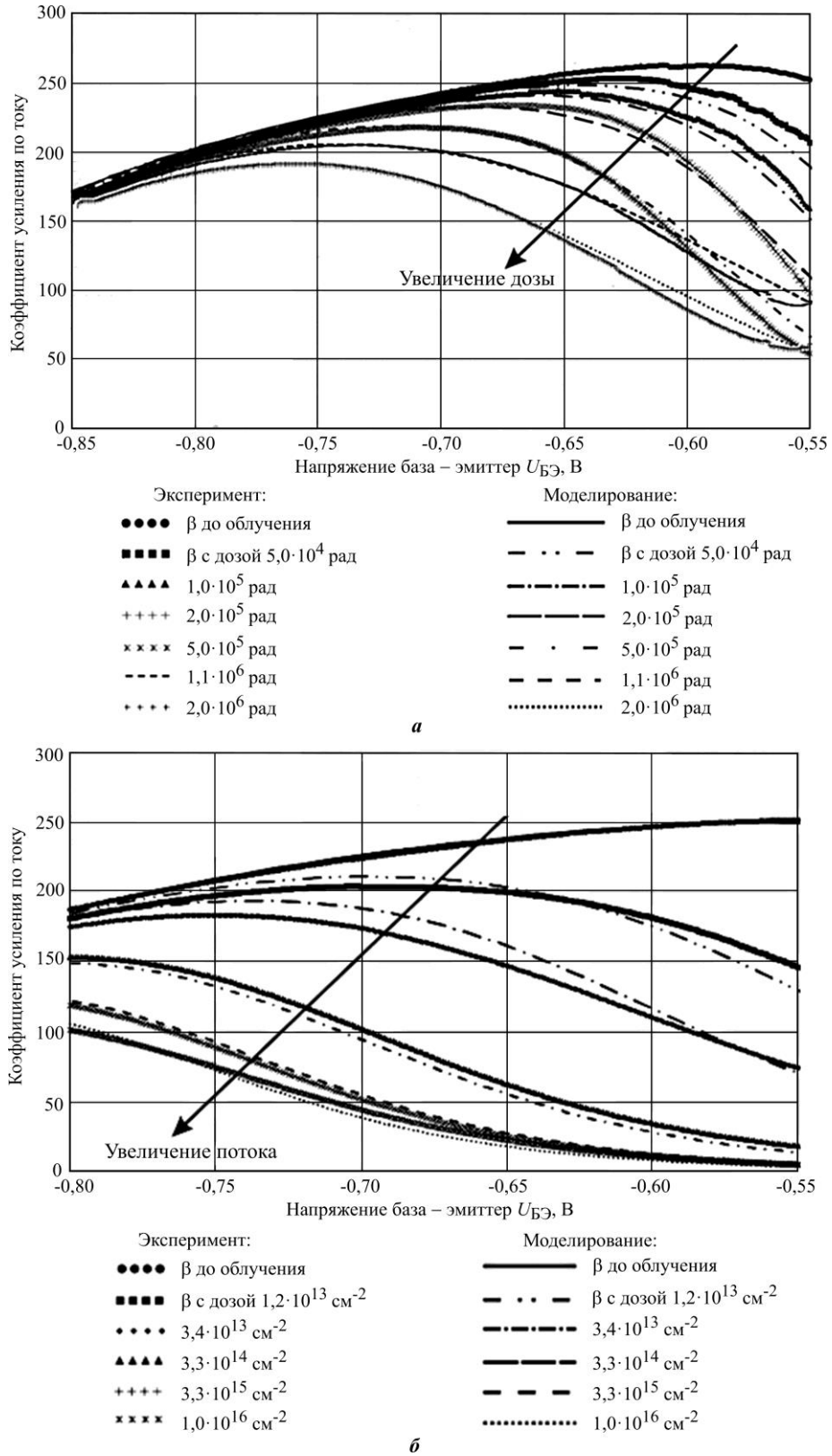


Рис. 3. Сравнение смоделированного и измеренного коэффициентов усиления тока SiGe ГБТ SGB25V до и после гамма-излучения (*а*) и облучения электронами (*б*)

Fig. 3. Comparison of simulated and measured current gain of SiGe HBT SGB25V before and after gamma irradiation (*a*) and electron irradiation (*b*)

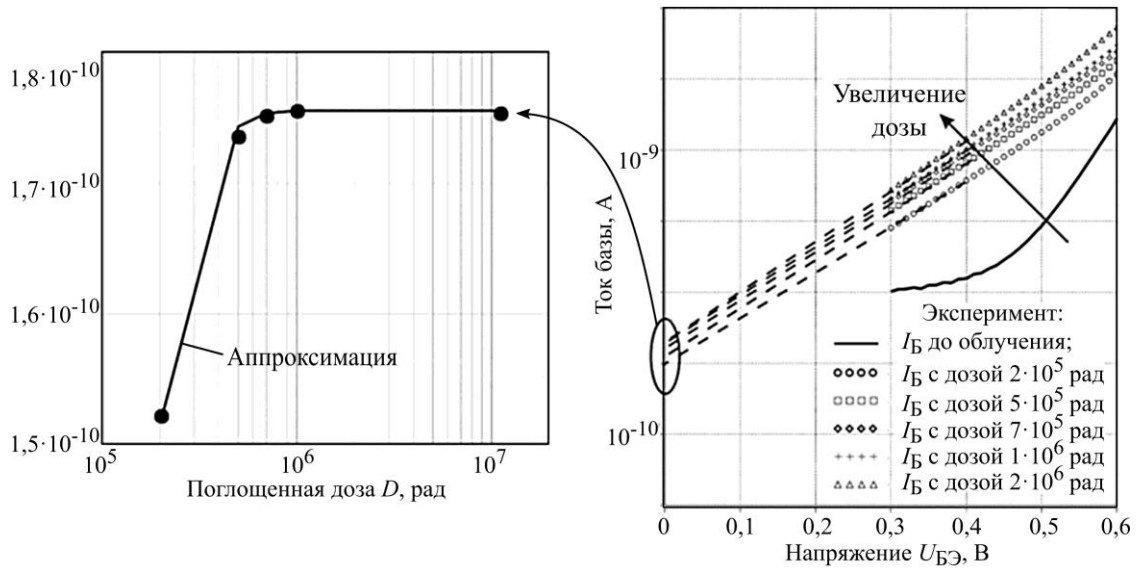
Шаг 4. По экспериментальным данным для каждого уровня дозы D_i или интегрального потока Φ_i определить: радиационно-индуцированный ток базы для ионизационных эффектов при напряжении база – эмиттер $U_{БЭ}$ = 0 В; радиационно-индуцированный ток базы для эффектов смещения при значении напряжения база – эмиттер $U_{БЭ}$ в диапазоне 0,5–0,7 В; напряжение насыщения на выходной характеристике в области насыщения; напряжение лавинного пробоя на выходных характеристиках в предпробойной области. Процедуру повторить для всех уровней воздействия D_i или Φ_i (i = 1, 2, 3,…,m).

Шаг 5. Радиационно-зависимые параметры БТ (см. шаг 4) $I_{surf}(D)$, $I_{bulk}(D)$, $V_{cor}(D)$ аппроксимировать аналитическими функциями вида $a1\cdot[1 - b1\cdot\exp(-a2\cdot D)]$ или $a3\cdot[1 + b2\cdot D)]$; значения коэффициентов $a1$, $a2$, $a3$, $b1$, $b2$ для указанных функций $I(D)$, $V(D)$ образуют набор радиационных параметров SPICE-RAD-модели БТ.

Шаг 6. Для определения коэффициентов функции $K_{ELDRS}(Drate)$, приведенных в выражение (7), построить зависимость радиационной добавки тока базы транзистора от мощности дозы излучения.

Шаг 7. Для включения в SPICE-RAD-модель радиационно-зависимых параметров, описываемых аналитическими функциями (1)–(7), определить по входным характеристикам БТ коэффициенты I_{sd}, n_{ed}, K_d и $I_{ss\,max}$, K_s, n_{es}, E, L, R, S, по выходным характеристикам БТ – параметры a, V_0, g, h, K_{AVC1}, K_{AVC2} (рис. 4).

Основным преимуществом предложенной методики экстракции радиационно-зависимых параметров SPICE-RAD-модели является то, что она базируется на данных, полученных в результате измерений стандартного набора характеристик прибора по стандартным методикам, известным широкому кругу разработчиков. Никаких дополнительных измерений для определения параметров SPICE-RAD-модели с помощью представленной методики не требуется.



а

Рис. 4. Определение коэффициентов $I_{ss\,max}$, K_s, n_{es} (*а*)
Fig. 4. Parameters extraction $I_{ss\,max}$, K_s, n_{es} (*a*)

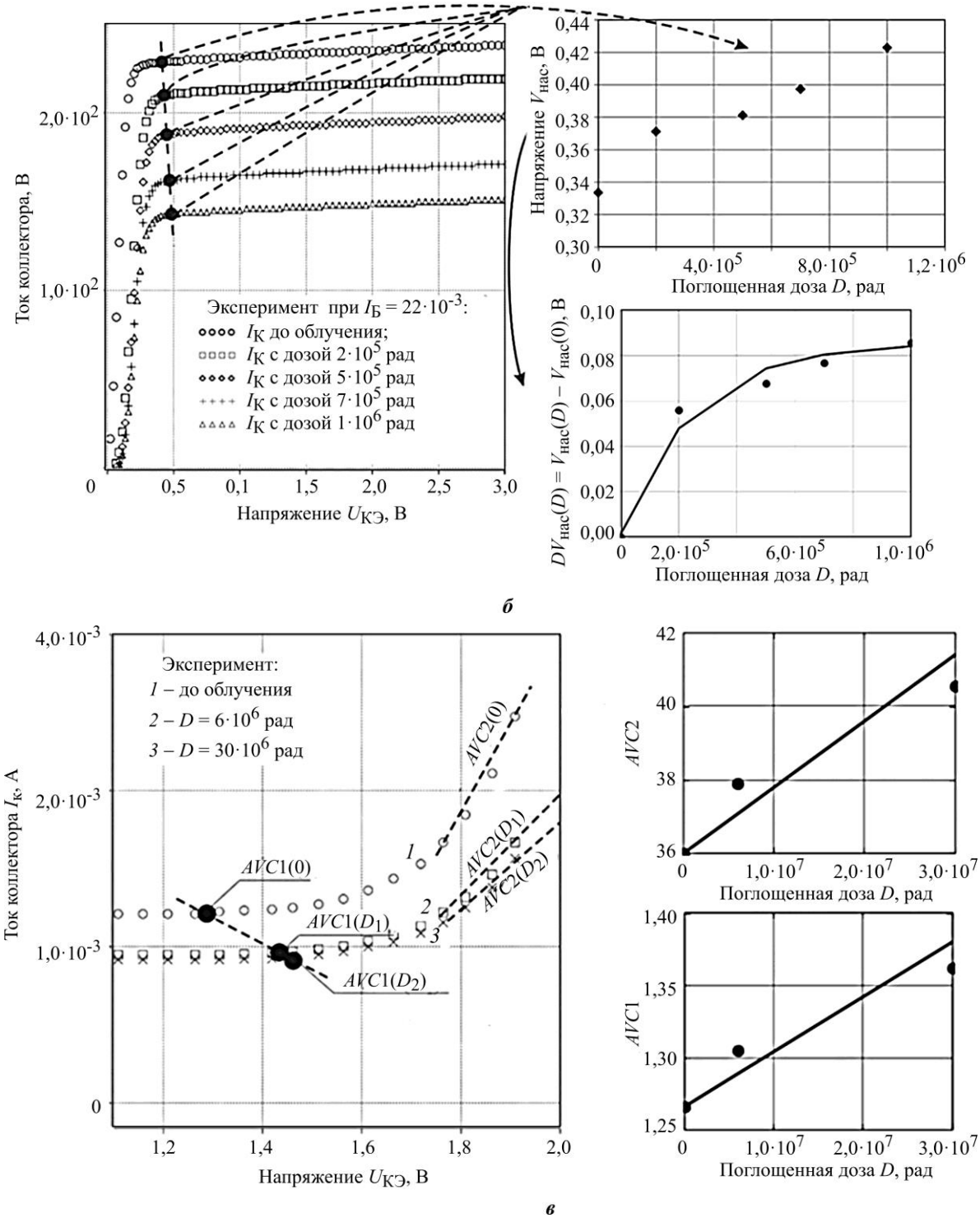


Рис. 4. Определение коэффициентов a, $V0$, g, h (*б*), K_{AVC1}, K_{AVC2} (*в*)
Fig. 4. Parameters extraction a, $V0$, g, h (*b*), K_{AVC1}, K_{AVC2} (*c*)

Моделирование ОУ с учетом радиационных факторов. С помощью представленной SPICE-RAD-модели проведено схемотехническое моделирование прецизионного ОУ с обратной связью по напряжению с полосой пропускания 30 МГц и скоростью нарастания напряжения 120 В/мкс (аналог AD829). Функциональная схема ОУ приведена на рис. 5.

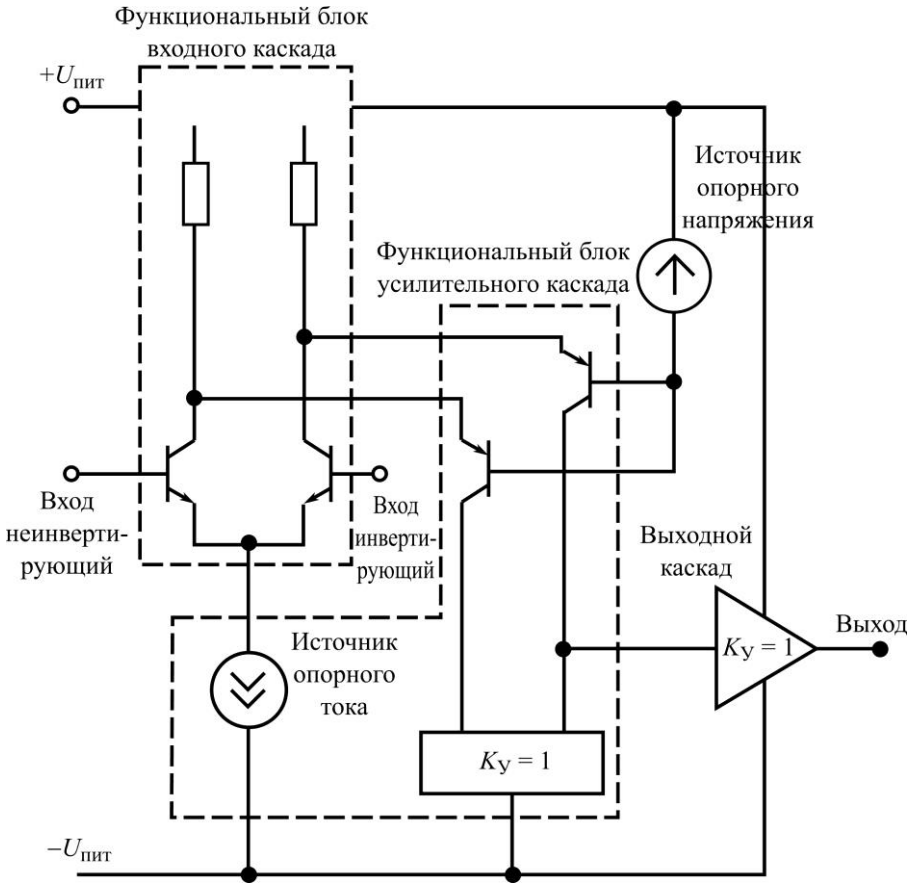


Рис. 5. Функциональная схема ОУ
Fig. 5. Functional diagram of the Op-Amp

В составе рассматриваемого ОУ применены три типа комплементарных *n–p–n*/*p–n–p*-транзисторов, изготовленных по технологии 0,6 мкм, которые различаются площадью и периметром эмиттера. Размеры комплементарных *n–p–n*/*p–n–p*-транзисторов приведены в таблице.

Размеры комплементарных *n–p–n*/*p–n–p*-транзисторов
Dimensions of complementary *n–p–n*/*p–n–p* transistors

Тип транзистора		Площадь эмиттера, мкм^2	Периметр эмиттера, мкм
PNP05	NPN05	90	42
PNP15	NPN15	240	104
PNP50	NPN50	1080	408

Образцы *n–p–n*/*p–n–p*-транзисторов подвергали облучению гамма-квантами (источник Cs-137) с мощностью дозы 36 рад (SiO_2)/с в пассивном режиме с закороченными выводами. Сравнение результатов измерений коэффициента усиления по току с результатами моделирования тестовых транзисторов после воздействия гамма-квантов приведено на рис. 6. Изменение электрических характеристик пассивных компонентов, входящих в состав ОУ, происходит при больших поглощенных дозах более 10 Мрад (Si) [16, 17]. Поэтому их влияние на характеристики ОУ при указанных уровнях дозы незначительны. Расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования составляет не более 20 %.

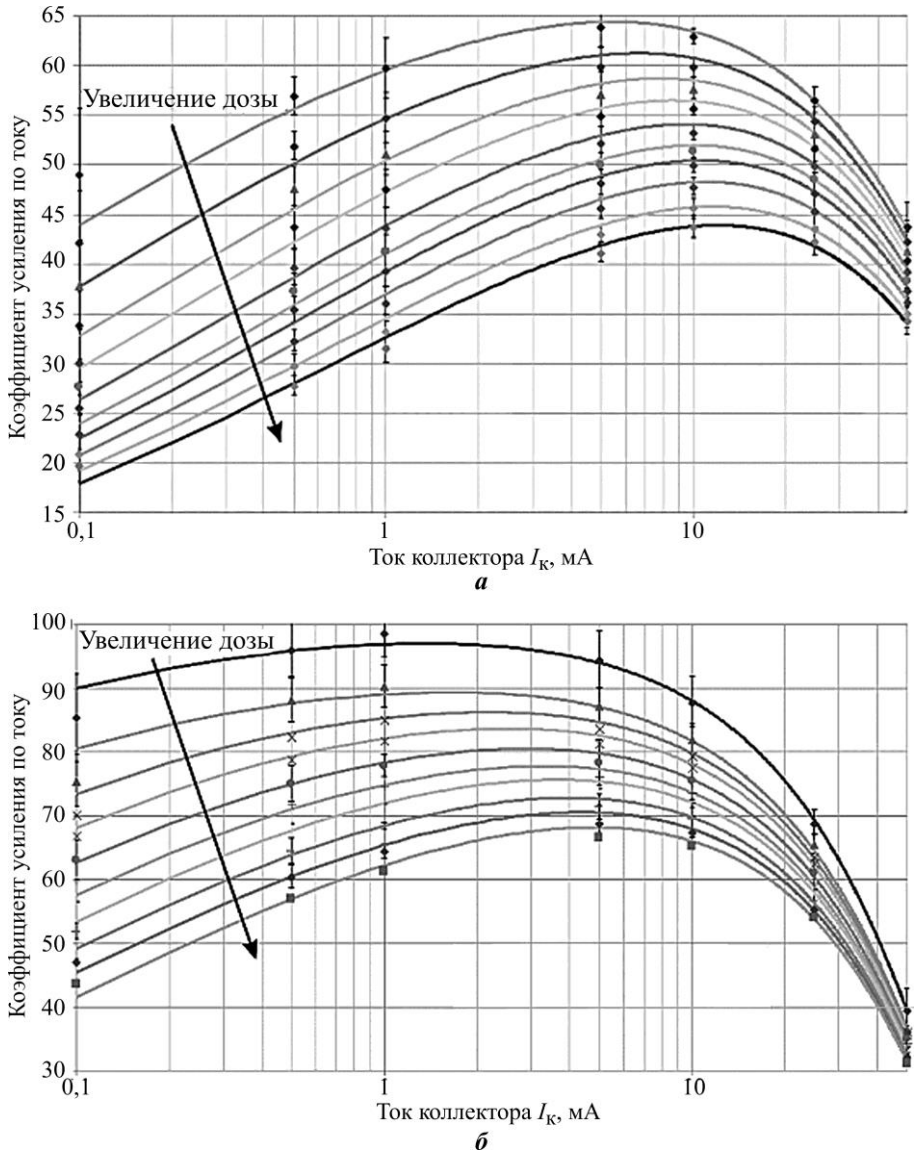


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных (точки) с данными моделирования (линии) биполярных транзисторов NPN50 (*а*) и PNP50 (*б*) до и после облучения гамма-лучами с мощностью дозы 100, 200, 350, 600, 850, 1100, 1600, 2300, 3000 крад (SiO_2)

Fig. 6. Comparison of experimental data (dots) and simulation data (lines) of bipolar transistors NPN50 (*a*) and PNP50 (*b*) before and after irradiation with gamma rays at doses: 100, 200, 350, 600, 850, 1100, 1600, 2300, 3000 krad (SiO_2)

После определения параметров SPICE-моделей БТ проведено моделирование схемы ОУ с учетом воздействия гамма-излучения. Влияние ионизирующего излучения на электрические характеристики ОУ оценено по зависимости коэффициента усиления без обратной связи, напряжения смещения, входных токов и скорости нарастания выходного напряжения от поглощенной дозы. На рис. 7 показано сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования для коэффициента усиления без обратной связи, выходных напряжений и напряжений смещения ОУ после гамма-облучения.

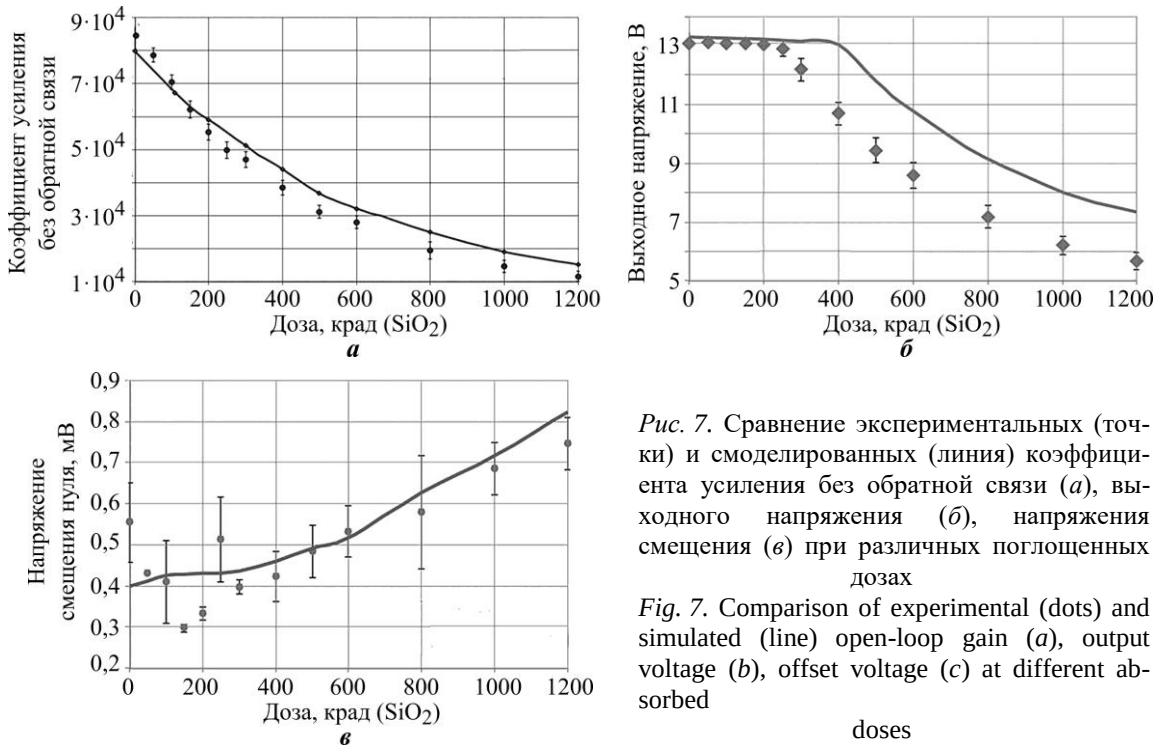


Рис. 7. Сравнение экспериментальных (точки) и смоделированных (линия) коэффициента усиления без обратной связи (*а*), выходного напряжения (*б*), напряжения смещения (*в*) при различных поглощенных дозах

Fig. 7. Comparison of experimental (dots) and simulated (line) open-loop gain (*a*), output voltage (*b*), offset voltage (*c*) at different absorbed doses

Моделирование ОУ с учетом эффектов малой мощности дозы излучения. Исследования показывают, что эффекты малой мощности дозы радиационного излучения, приводящие к деградации, проявляются в том числе и в ОУ. Это особенно критично для электронной аппаратуры космических аппаратов [11–13]. Удовлетворительные SPICE-модели БТ, учитывающие эффекты малой мощности дозы радиации, не разработаны. Причиной является слишком большое время, требуемое для проведения эксперимента на реальных образцах микросхем ОУ для набора суммарной дозы, при которой наблюдается деградация электрических характеристик ОУ.

С целью преодоления существующих трудностей для построения SPICE-RAD-модели БТ с учетом эффектов малой мощности дозы излучения предлагается виртуальный метод ускоренных испытаний. Сначала строится модель для высокой мощности дозы излучения. При этом для верификации моделей не требуется больших временных затрат для достижения необходимой суммарной дозы. После этого в полученную модель вводятся корректирующие выражения, учитывающие эффекты малой мощности дозы излучения. Объектом для исследования влияния интенсивности излучения на электрические характеристики ОУ выбран прибор uA741 как наиболее распространенный тип ОУ, для которого имеет место существенная деградация рабочих характеристик при облучении с низкой мощностью дозы (рис. 8) [18].

На первом этапе были подобраны три комплекта SPICE-RAD-моделей для транзисторов Q_1–Q_{24}, на которых построена схема, показанная на рис. 8. Модели разработаны на базе имеющихся экспериментальных данных для БТ с высоким, средним и низким уровнем стойкости. Соответствующий уровень стойкости БТ достигается за счет применения различных конструктивно-технологических решений. Такой подход позволяет проводить прогнозирование деградации характеристик БТ и схемотехническое моделирование ИС с разным уровнем радиационной стойкости. В частности, на рис. 9 приведены результаты расчетов для параметра $K_u(D)$ в сравнении с экспериментальными данными работы [19]. Видно, что наилучшее совпадение получено для набора транзисторов с высокой радиационной стойкостью.

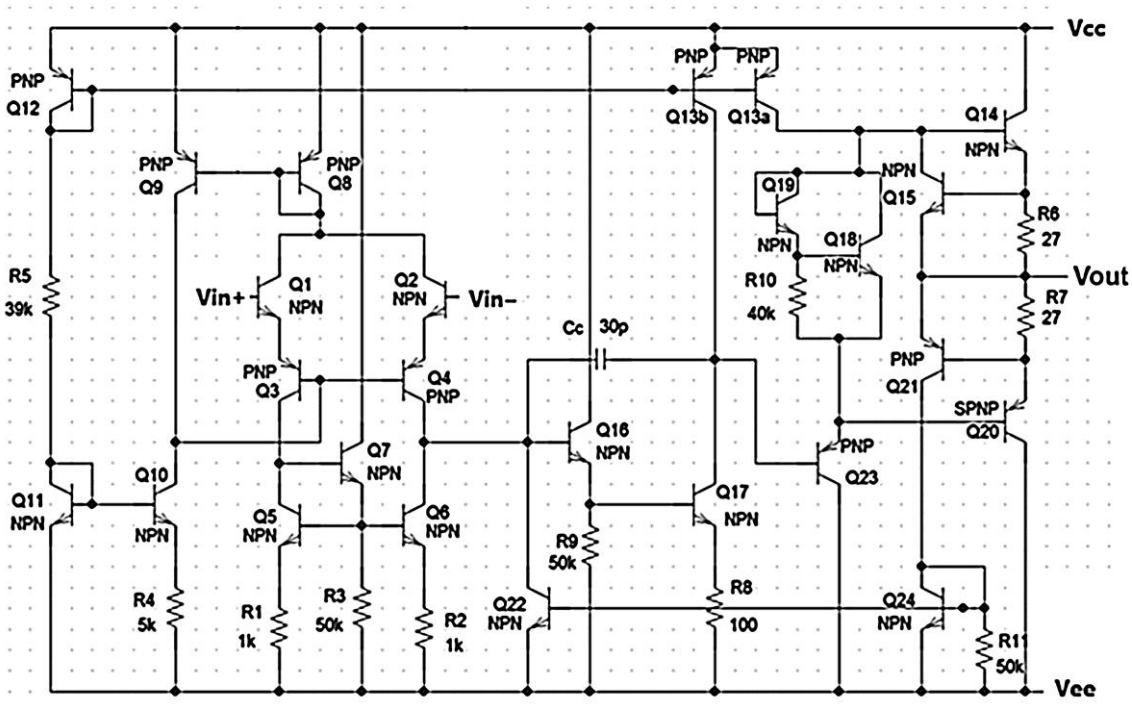


Рис. 8. Схема ОУ uA741
Fig. 8. Op-Amp uA741 circuit

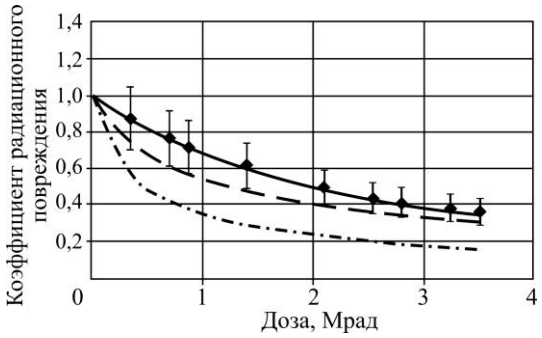


Рис. 9. Сравнение экспериментальных данных [19] с результатами моделирования коэффициента радиационного повреждения $K_u(D)$ / K_u (D = 0 рад) для разных уровней деградации: ♦ – эксперимент; —— слабая степень деградации; — — средняя степень деградации; – · – · – сильная степень деградации

Fig. 9. Comparison of experimental data [19] and the simulation results of the radiation damage coefficient $K_u(D)$ / K_u (D = 0 rad) for different radiation hardness levels: ♦ – experiment; —— low degree of degradation; — — average degree of degradation; – · – · – severe degree of degradation

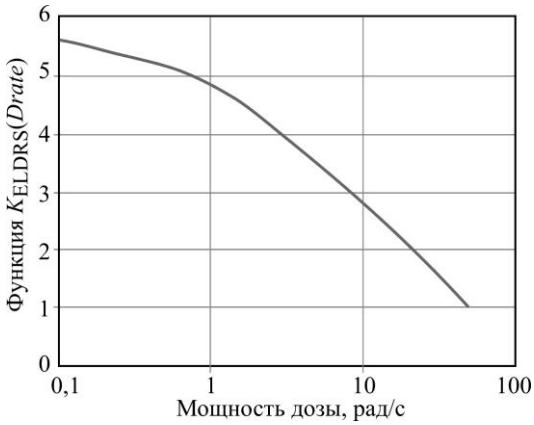


Рис. 10. Зависимость функции $K_{ELDRS}(Drate)$ от мощности излучения

Fig. 10. Dependence of the $K_{ELDRS}(Drate)$ parameter on the radiation dose rate

На втором этапе в уравнение (6) для SPICE-RAD-модели для транзисторов Q_1–Q_{24} добавлена функция $K_{ELDRS}(Drate)$ (рис. 10), учитывающая эффекты низкой мощности дозы излучения. Зависимость, приведенная на рис. 10, для различных типов Si БТ и Si-Ge ГБТ [10, 12, 20] одинакова и может быть описана функцией (7), параметры которой определяются методом подгонки под эксперимент.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для выходного напряжения ОУ представлено на рис. 11. Видно, что погрешность составляет не более 20 %. Это подтверждает пригодность разработанной модели для оценки радиационной стойкости ОУ после облучения малыми мощностями дозы гамма-излучения. На рис. 12 приведены результаты моделирования напряжения смещения нуля ОУ до и после облучения малыми мощностями дозы гамма-излучения.

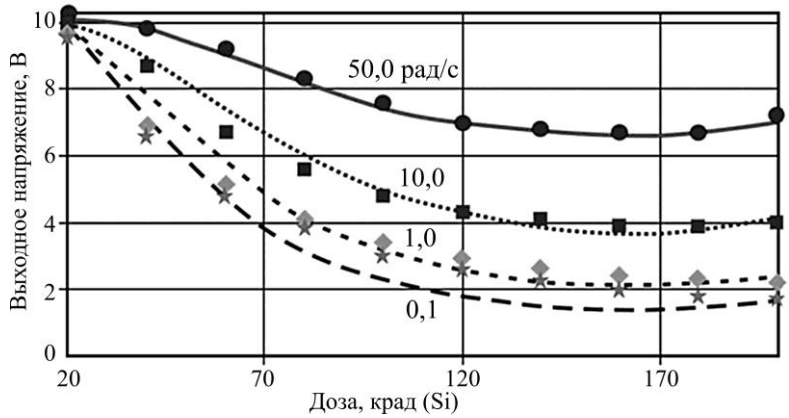


Рис. 11. Сравнение смоделированного выходного напряжения ОУ (линии) с экспериментальными данными (точки) [18] при облучении с разной мощностью дозы гамма-излучения

Fig. 11. Comparison of experimental (dots) [18] and simulated open loop gain of uA741 (lines) after gamma irradiation with different dose rates

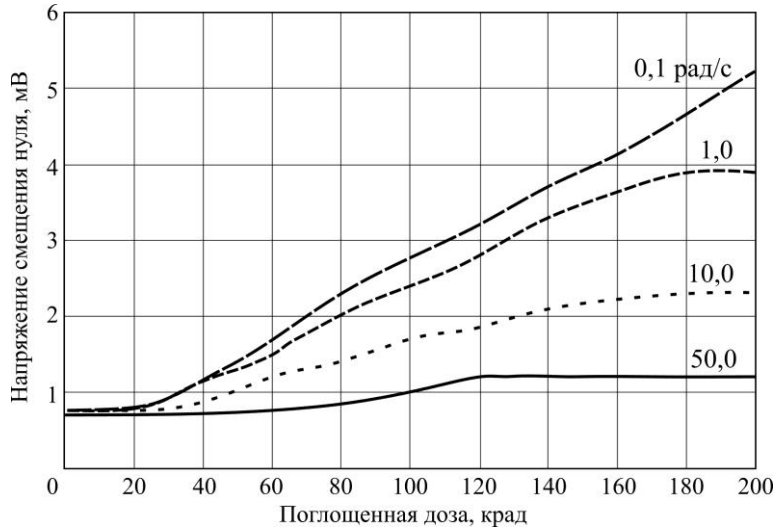


Рис. 12. Моделирование напряжения смещения нуля ОУ при облучении с разной мощностью дозы гамма-излучения

Fig. 12. Simulated offset voltage of the Op-Amp during irradiation with different dose gamma rates

Заключение. Разработанная универсальная SPICE-RAD-модель для учета дозовых радиационных эффектов адекватно описывает характеристики Si БТ и SiGe ГБТ, подвергнутых воздействию различных видов радиации: гамма-квантов, электронов, нейтронов и протонов. Погрешность моделирования статических ВАХ Si БТ и SiGe ГБТ не превышает 20 % в диапазоне доз до 2 Мрад. Модель встраивается в коммерческие схемотехнические программы HSPICE, PSPICE, LTSPICE, ELDO и другие и может использоваться для расчета аналоговых схем с учетом поглощенной дозы или мощности дозы излучения, изменяющихся в широких приделах.

Полученные численные оценки деградации характеристик (коэффициента усиления, выходного напряжения, входного тока, напряжения смещения нуля) для аналога прибора AD829 в диапазоне доз до 2 Мрад с мощностью дозы 36 рад/с подтверждены экспериментальными результатами, для аналога прибора uA741 в диапазоне мощностей доз 0,1–50 рад/с после набора суммарной дозы 200 крад – результатами работ [18, 19].

Литература

1. ***Huang X., Francis A. M., Lostetter A. B., Mantooth H. A.*** Compact modeling of environmentally induced radiation effects on electrical devices // 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720). Big Sky, MT: IEEE, 2004. Vol. 4. P. 2597–2607. https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368054

2. Modeling and simulation of dose effects in bipolar analog integrated circuits / ***G. I. Zebrev, M. G. Drosdetsky, A. M. Galimov et al.*** // Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics. 2014. Vol. 9440. Art. ID: 94401C. https://doi.org/10.1117/12.2180758

3. ***Mikkola E. O., Vermeire B., Parks H. G., Graves R.*** VHDL-AMS modeling of total ionizing dose radiation effects on CMOS mixed signal circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007. Vol. 54. No. 4. P. 929–934. https://doi.org/10.1109/TNS.2007.903185

4. ***Jagannathan S., Herbison D. R., Holman W. T., Massengill L. W.*** Behavioral modeling technique for TID degradation of complex analog circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010. Vol. 57. No. 6. P. 3708–3715. https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2056699

5. ***Leroux P., De Cock W., Van Uffelen M., Steyaert M.*** Modeling, design, assessment of 0.4 μm SiGe bipolar VCSEL driver IC under γ-radiation // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. Vol. 56. No. 4. P. 1920–1925. https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2018840

6. ***Deng Y., Fjeldly T. A., Ytterdal T., Shur M. S.*** SPICE modeling of neutron displacement damage and annealing effects in bipolar junction transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. 2003. Vol. 50. No. 6. P. 1873–1877. https://doi.org/10.1109/tns.2003.821391

7. Gain degradation of lateral and substrate pnp bipolar junction transistors / ***S. C. Witczak, R. D. Schrimpf, K. F. Galloway et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. Vol. 43. No. 6. P. 3151–3160. https://doi.org/10.1109/23.556919

8. ***Petrosjanc K. O., Kharitonov I. A.*** VLSI device parameters extraction for radiation hardness modeling with SPICE // Proceedings of the 1993 International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS 93). Sitges: IEEE, 1993. P. 9–14. https://doi.org/10.1109/ICMTS.1993.292901

9. ***Van Uffelen M., Geboers S., Leroux P., Berghmans F.*** SPICE modeling of a discrete COTS SiGe HBT for digital applications up to MGy dose levels // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. Vol. 53. No. 4. P. 1945–1949. https://doi.org/10.1109/TNS.2006.880949

10. Радиационная стойкость изделий ЭКБ / под ред. ***А. И. Чумакова***. М.: НИЯУ «МИФИ», 2015. 512 с.

11. ***Pease R. L., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M.*** ELDRS in bipolar linear circuits: A review // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. Vol. 56. No. 4 (2). P. 1894–1908. https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2011485

12. ***Танеро К. И.*** Эффекты низкоинтенсивного облучения в приборах и интегральных схемах на базе кремния // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19. № 1. С. 5–21. https://doi.org/10.17073/1609-3577-2016-1-5-21. – EDN: URIGLC.

13. Enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS) of linear circuits in a space environment / ***J. L. Titus, D. Emily, J. F. Krieg et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1999. Vol. 46. No. 6. P. 1608–1615. https://doi.org/10.1109/23.819128

14. SPICE-model of SiGe HBT taking into account radiation effects / ***K. O. Petrosyants, M. V. Kozhukhov, O. V. Dvornikov et al.*** // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow: IEEE, 2018. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/MWENT.2018.8337211

15. opt_ex06: Gummel–Poon bipolar model extraction // SILVACO [Электронный ресурс]. URL: https://silvaco.com/examples/utmost4/section1/example6/index.html (дата обращения: 15.07.2024).

16. Testing the radiation hardness of thick-film resistors for a time-of-flight mass spectrometer at Jupiter with 18 MeV protons / ***D. Lasi, M. Tulej, M. B. Neuland et al.*** // 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). New Orleans, LA: IEEE, 2017. P. 1–9. https://doi.org/10.1109/NSREC.2017.8115474

17. ***Ding M.*** The radiation response of hafnium oxide based metal-oxide-semiconductor capacitors under ^{60}Co gamma ray // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26. No. 1. P. 10–16. https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007316

18. Modeling ELDRS effects in bipolar integrated circuits / ***H. Baoping, M. Wuying, Y. Zhibin et al.*** // 2017 International Workshop on Reliability of Micro- and Nano-Electronic Devices in Harsh Environment (IWRMN-EDHE 2017). Chengdu: Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, 2017. P. 1–3.

19. ***Soliman F.*** Operational amplifier type 741: Characterization and radiation effects // Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Series A2-A3: Phys. Sci. and Eng. 1993. Vol. 42. P. 15–32. https://doi.org/10.1501/commua1-2_0000000051

20. Modeling low dose rate effects in shallow trench isolation oxides / ***I. S. Esqueda, H. J. Barnaby, P. C. Adell et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2011. Vol. 58. No. 6. P. 2945–2952. https://doi.org/10.1109/tns.2011.2168569

Статья поступила в редакцию 12.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 26.03.2024 г.; принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллиннская ул., 34), главный научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), kpetrosyants@hse.ru

Кожухов Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллиннская ул., 34), mkozhukhov@hse.ru

Попов Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент департамента компьютерной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллиннская ул., 34), da.popov@hse.ru

Харитонов Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, ул. Таллиннская, 34), ikharitonov@hse.ru

Корнеев Сергей Викторович – доктор технических наук, заместитель генерального директора по технологическому развитию и производству АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр-д, 27), korneev@pulsarnpp.ru

Дюканов Павел Алексеевич – начальник отделения АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр-д, 27), dukanov@pulsarnpp.ru

Смирнов Дмитрий Сергеевич – начальник лаборатории АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр-д, 27), smirnovds@pulsarnpp.ru

Вологдин Эрих Николаевич – старший научный сотрудник АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр-д, 27), vologdin_jn@pulsarnpp.ru

References

1. Huang X., Francis A. M., Lostetter A. B., Mantooth H. A. Compact modeling of environmentally induced radiation effects on electrical devices. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720).* Big Sky, MT, IEEE, 2004, vol. 4, pp. 2597–2607. https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368054

2. Zebrev G. I., Drosdetsky M. G., Galimov A. M., Lebedev A. A., Danilov I. A., Turin V. O. Modeling and simulation of dose effects in bipolar analog integrated circuits. *Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics,* 2014, vol. 9440, art. ID: 94401C. https://doi.org/10.1117/12.2180758

3. Mikkola E. O., Vermeire B., Parks H. G., Graves R. VHDL-AMS modeling of total ionizing dose radiation effects on CMOS mixed signal circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2007, vol. 54, no. 4, pp. 929–934. https://doi.org/10.1109/TNS.2007.903185

4. Jagannathan S., Herbison D. R., Holman W. T., Massengill L. W. Behavioral modeling technique for TID degradation of complex analog circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2010, vol. 57, no. 6, pp. 3708–3715. https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2056699

5. Leroux P., De Cock W., Van Uffelen M., Steyaert M. Modeling, design, assessment of 0.4 μm SiGe bipolar VCSEL driver IC under γ-radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2009, vol. 56, no. 4, pp. 1920–1925. https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2018840

6. Deng Y., Fjeldly T. A., Ytterdal T., Shur M. S. SPICE modeling of neutron displacement damage and annealing effects in bipolar junction transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices,* 2003, vol. 50, no. 6, pp. 1873–1877. https://doi.org/10.1109/tns.2003.821391

7. Witczak S. C., Schrimpf R. D., Galloway K. F., Fleetwood D. M., Pease R. L., Puhl J. M., Schmidt D. M., Combs W. E., Suehle J. S. Gain degradation of lateral and substrate pnp bipolar junction transistors. *IEEE transactions on Nuclear Science,* 1996, vol. 43, no. 6, pp. 3151–3160. https://doi.org/10.1109/23.556919

8. Petrosjanc K. O., Kharitonov I. A. VLSI device parameters extraction for radiation hardness modeling with SPICE. *Proceedings of the 1993 International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS 93).* Sitges, IEEE, 1993, pp. 9–14. https://doi.org/10.1109/ICMTS.1993.292901

9. Van Uffelen M., Geboers S., Leroux P., Berghmans F. SPICE modeling of a discrete COTS SiGe HBT for digital applications up to MGy dose levels. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2006, vol. 53, no. 4, pp. 1945–1949. https://doi.org/10.1109/TNS.2006.880949

10. Chumakov A. I., ed. *Radiation resistance of electronic component base products.* Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2015. 512 p. (In Russian).

11. Pease R. L., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M. ELDRS in bipolar linear circuits: A review. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2009, vol. 56, no. 4 (2), pp. 1894–1908. https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2011485

12. Tapero K. I. Low dose rate effects in silicon-based devices and integrated circuits: A review. *Russ. Microelectron.,* 2018, vol. 47, no. 8, pp. 539–552. https://doi.org/10.1134/S1063739718080127

13. Titus J. L., Emily D., Krieg J. F., Turflinger T., Pease R. L., Campbell A. Enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS) of linear circuits in a space environment. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 1999, vol. 46, no. 6, pp. 1608–1615. https://doi.org/10.1109/23.819128

14. Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V., Dvornikov O. V., Savchenko E. M., Budyakov A. S. SPICE-model of SiGe HBT taking into account radiation effects. *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT).* Moscow, IEEE, 2018, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/MWENT.2018.8337211

15. opt_ex06: Gummel–Poon bipolar model extraction. *SILVACO.* Available at: https://silvaco.com/examples/utmost4/section1/example6/index.html (accessed: 15.07.2024).

16. Lasi D., Tulej M., Neuland M. B., Wurz P., Carzaniga T. S., Nesteruk K. P., Braccini S., Elsener H. R. Testing the radiation hardness of thick-film resistors for a time-of-flight mass spectrometer at Jupiter with 18 MeV protons. *2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW).* New Orleans, LA, IEEE, 2017, pp. 1–9. https://doi.org/10.1109/NSREC.2017.8115474

17. Ding M. The radiation response of hafnium oxide based metal-oxide-semiconductor capacitors under ^{60}Co gamma ray. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,* 2019, vol. 26, no. 1, pp. 10–16. https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007316

18. Baoping H., Wuying M., Zhibin Y., Zujun W., Jiangkun S., Guantao D., Yuanyuan X. Modeling ELDRS effects in bipolar integrated circuits. *2017 International Workshop on Reliability of Micro- and Nano-Electronic Devices in Harsh Environment (IWRMN-EDHE 2017).* Chengdu, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, 2017, pp. 1–3.

19. Soliman F. Operational amplifier type 741: Characterization and radiation effects. *Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Series A2-A3: Phys. Sci. and Eng.*, 1993, vol. 42, pp. 15–32. https://doi.org/10.1501/commua1-2_0000000051

20. Esqueda I. S., Barnaby H. J., Adell P. C., Rax B. G., Hjalmarson H. P., McLain M. L., Pease R. L. Modeling low dose rate effects in shallow trench isolation oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, vol. 58, no. 6, pp. 2945–2952. https://doi.org/10.1109/tns.2011.2168569

The article was submitted 12.12.2023; approved after reviewing 26.03.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University "Higher School of Economics" (Russia, 123458, Moscow, Tallinnskaya st., 34), Chief Researcher, Institute of Design Problems of Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), kpetrosyants@hse.ru

Maksim V. Kozhukhov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University "Higher School of Economics" (Russia, 123458, Moscow, Tallinnskaya st., 34), mkozhukhov@hse.ru

Dmitriy A. Popov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University "Higher School of Economics" (Russia, 123458, Moscow, Tallinnskaya st., 34), da.popov@hse.ru

Igor A. Kharitonov – Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University "Higher School of Economics" (Russia, 123458, Moscow, Tallinnskaya st., 34), ikharitonov@hse.ru

Sergey V. Korneev – Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Technological Development and Production, "NPP Pulsar" JSC (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy dr., 27, bld. 4), korneev@pulsarnpp.ru

Pavel A. Dukanov – Head of the Department, "NPP Pulsar" JSC (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy dr., 27, bld. 4), dukanov@pulsarnpp.ru

Dmitriy S. Smirnov – Head of the Laboratory, "NPP Pulsar" JSC (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy dr., 27, bld. 4), smirnovds@pulsarnpp.ru

Erich N. Vologdin – Senior Scientific Researcher, "NPP Pulsar" JSC (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy dr., 27, bld. 4), vologdin_jn@pulsarnpp.ru

Научная статья
УДК 519.714.5
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-658-678
EDN: GIOVEJ

Выбор блочных покрытий при схемной реализации разреженных систем дизъюнктивных нормальных форм булевых функций

П. Н. Бибило, С. Н. Кардаш, В. И. Романов

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

bibilo@newman.bas-net.by

Аннотация. Для матричных форм разреженных систем дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ) булевых функций троичная матрица, задающая элементарные конъюнкции, содержит большую долю неопределенных значений, соответствующих в алгебраической записи отсутствующим литералам булевых переменных, а булева матрица, задающая вхождения конъюнкций в ДНФ функций, содержит большую долю нулевых значений. В работе рассмотрена проблема выбора лучших способов схемной реализации в заказных цифровых СБИС разреженных систем ДНФ полностью определенных булевых функций. Установлено, что для таких систем ДНФ достаточно эффективным способом технологически независимой оптимизации является двухэтапный способ, включающий в себя на первом этапе блочное покрытие системы ДНФ блоками (подсистемами ДНФ) меньшей размерности, на втором этапе – минимизацию многоуровневых представлений подсистем функций блоков в классе бинарных диаграмм решений либо в классе булевых сетей. Показано, что выбор лучшего блочного покрытия основан на переборе покрытий с ограниченным числом входных переменных блоков покрытия.

Ключевые слова: система булевых функций, дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ), минимизация ДНФ, Binary Decision Diagram (BDD), булева сеть, разложение Шеннона, блочное покрытие системы ДНФ, синтез логической схемы, заказная СБИС, VHDL

Для цитирования: Бибило П. Н., Кардаш С. Н., Романов В. И. Выбор блочных покрытий при схемной реализации разреженных систем дизъюнктивных нормальных форм булевых функций // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 658–678. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-658-678. – EDN: GIOVEJ.

© П. Н. Бибило, С. Н. Кардаш, В. И. Романов, 2024

Original article

Selection of block coverage for schematic implementation of sparse systems of disjunctive normal forms of Boolean functions

P. N. Bibilo, S. N. Kardash, V. I. Romanov

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

bibilo@newman.bas-net.by

Abstract. For matrix forms of sparse systems of disjunctive normal forms (DNF), the ternary matrix specifying elementary conjunctions contains a large proportion of undefined values corresponding to missing literals of Boolean variables in algebraic notation, and the Boolean matrix specifying the occurrences of conjunctions in DNF of functions contains a large proportion of zero values. In this work, the problem of selection of best ways of circuit implementation in custom digital VLSI of sparse DNF systems of fully defined Boolean functions is considered. It has been established that for such DNF systems, an effective method of technologically independent optimization is a two-stage method, including at the first stage block coverage of the DNF system with blocks
(DNF subsystems) of smaller dimension, and at the second stage minimization of multilevel representations of subsystems of block functions in the class of binary decision diagrams or in the class of Boolean networks. It was demonstrated that the selection of best block coverage is based on item-by-item examination of coverages with a limited number of input variables of the blocks of coverage.

Keywords: Boolean function system, disjunctive normal form (DNF), DNF minimization, Binary Decision Diagram (BDD), Boolean network, Shannon expansion, block coverage of DNF system, logic synthesis, ASIC, custom VLSI, VHDL

For citation: Bibilo P. N., Kardash S. N., Romanov V. I. Selection of block coverage for schematic implementation of sparse systems of disjunctive normal forms of Boolean functions. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 658–678. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-658-678. – EDN: GIOVEJ.

Введение. Проблема эффективной реализации комбинационной логики заказных СБИС по-прежнему является актуальной при создании средств автоматизированного проектирования. Это обусловлено постоянно растущей размерностью решаемых задач синтеза логических схем, изменениями библиотек проектирования, связанными с новыми технологиями производства кристаллов [1, 2], ужесточением требований к энергопотреблению. Для решения задач логического проектирования совершенствуются известные методы и появляются новые модели структур данных для функциональных описаний систем булевых функций, являющихся математическими моделями комбинационных схем [2–5]. Проектирование типовых комбинационных устройств и устройств управляющей логики ведется различными способами.

Методы и средства проектирования типовых устройств комбинационной логики (сумматоров, умножителей, компараторов, дешифраторов и т. д.) опираются на алго-

ритмическое проектирование с использованием функционально-структурных и иерархических описаний и привязываются к базису проектирования – библиотекам синтеза схем заказных СБИС либо к структурам программируемых элементов FPGA. Например, для FPGA развиваются специальные методы проектирования умножителей [6], компараторов [7], модулярных умножителей [8], продолжаются исследования в области проектирования сумматоров [9].

Логическое проектирование нерегулярных схем управляющей логики в базисе библиотечных логических элементов заказных СБИС обычно проводится в два этапа. На первом этапе осуществляется технологически независимая оптимизация, на втором – технологическое покрытие (technology mapping) минимизированных функциональных описаний систем булевых функций описаниями поведения базисных логических элементов. На втором этапе также решаются оптимизационные задачи, связанные с выбором фрагментов в оптимизированных описаниях и нахождением тех логических элементов, которые могут реализовать выбранные фрагменты [10].

Важнейшим является первый этап, на котором выбирается форма представления системы булевых функций и осуществляется минимизация этой формы. По результату выполнения первого этапа определяются основные параметры синтезированной на втором этапе логической схемы – площадь, временная задержка и энергопотребление. Для сокращения энергопотребления используются специальные методы, такие как clock'gating [11], сохранение в регистрах элементов памяти значений неиспользованных сигналов [12], создаются системы управления питанием [13]. Для повышения быстродействия схем развиваются методы и средства конвейеризации, особенно при реализации цифровых систем в сложных FPGA [14]. Разнообразные формы описаний исходных систем булевых функций требуют проведения комбинированных способов технологически независимой оптимизации, это в первую очередь касается задач большой размерности, когда на первом этапе проводится разложение задачи оптимизации на ряд подзадач.

В настоящей работе рассматривается одна из классических форм описания функционирования комбинационных схем – система дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ) [15] полностью определенных булевых функций – и выделяется класс разреженных систем ДНФ. Показывается, что для разреженных систем ДНФ достаточно эффективным способом технологически независимой оптимизации является двухэтапный способ, включающий в себя блочное покрытие системы ДНФ и последующую минимизацию блоков покрытия на основе многоуровневых BDD-представлений (Binary Decision Diagram – бинарная диаграмма решений) либо многоуровневых представлений в виде булевых сетей, так как результат блочного покрытия системы ДНФ – логическая сеть подсистем ДНФ меньшей размерности. Описываются соответствующие эксперименты по схемной реализации промышленных примеров разреженных систем ДНФ. Показывается эффективность предлагаемого способа при синтезе комбинационных схем в базисе проектирования заказных КМОП СБИС, позволяющего ограничивать при блочном покрытии размерность блоков покрытия, использовать разные критерии выбора лучших покрытий и применять различные программы минимизации многоуровневых представлений подсистем функций, описывающих блоки покрытия.

BDDI-минимизация систем булевых функций. Графовые BDD-представления систем функций строятся на основе разложения Шеннона. Разложением Шеннона булевой функции $f = f(\boldsymbol{x})$, $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, по переменной x_i называется представление

$$f = f(\boldsymbol{x}) = \overline{x}_i\, f(x_1,\ldots,x_{i-1},0,x_{i+1},\ldots,x_n) \vee x_i\, f(x_1,\ldots,x_{i-1},1,x_{i+1},\ldots,x_n)\,. \qquad (1)$$

Функции $f_0 = f(x_1,...,x_{i-1},0,x_{i+1},...,x_n)$, $f_1 = f(x_1,...,x_{i-1},1,x_{i+1},...,x_n)$ в правой части (1) называются кофакторами (cofactors) разложения по переменной x_i. Они получаются из функции f подстановкой вместо переменной x_i константы 0 и 1 соответственно. Каждый из кофакторов f_0 и f_1 может быть разложен по одной из переменных из множества $\{x_1,\ldots, x_{i-1}, x_{i+1},\ldots, x_n\}$. Процесс разложения кофакторов заканчивается, когда все n переменных будут использованы для разложения либо когда все кофакторы выродятся до констант 0, 1.

BDDI (Binary Decision Diagram with Inverse cofactors) – ориентированный бесконтурный граф, задающий последовательные разложения Шеннона системы булевых функций $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = (f^1(\boldsymbol{x}),\ldots, f^m(\boldsymbol{x}))$, $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2,\ldots, x_n)$ по всем ее переменным $x_1,\ldots, x_n$ при заданном порядке (перестановке) переменных, по которым проводятся разложения, при условии нахождения пар взаимно инверсных кофакторов [16]. Вершине графа BDDI соответствует пара взаимно инверсных кофакторов, найденных среди всех кофакторов системы булевых функций при разложениях Шеннона по одной и той же переменной.

Под BDDI-минимизацией понимается сокращение числа логических выражений (логических уравнений), соответствующих графовому BDDI-представлению, что сводится к поиску лучшей перестановки переменных для разложений Шеннона, для которой число вершин графа BDDI (число логических уравнений) будет наименьшим. Построение логических уравнений, соответствующих графу BDDI, осуществлялось программой BDD_Builder [16]. Примеры (рисунки) графов BDDI- и Bool-представлений и соответствующих им логических уравнений приведены в [16].

Bool-минимизация систем булевых функций. Bool-представление системы булевых функций соответствует булевой сети (ориентированному бесконтурному графу), функциями вершин которой могут быть логические операции «конъюнкция» либо «дизъюнкция» над литералами (булева переменная либо ее инверсия) булевых переменных. Вершина булевой сети имеет две заходящие дуги и может иметь одну либо две исходящие дуги, соответствующие результату операции (прямой выход) и инверсированному результату операции (инверсный выход). При этом предполагается, что доступны как прямые, так и инверсные значения входных переменных. Логическая минимизация булевых сетей (Bool-минимизация) на основе разложения Шеннона заключается в поиске такой перестановки переменных разложения, при которой число литералов в булевой сети является наименьшим. В булевой сети разложение Шеннона записывается в виде трех формул

$$f(\boldsymbol{x}) = w_0 \vee w_1, \quad w_0 = \overline{x}_i f_0, \quad w_1 = x_i f_1. \tag{2}$$

Формулы (1) и (2) представляют собой отдельное разложение Шеннона и содержат одинаковое число логических операторов, а число используемых в них литералов различно.

После разложения Шеннона по очередной переменной минимизация булевой сети сводится к следующему: ищутся вершины булевой сети, опирающиеся на одинаковые подсети, после чего проводится сокращение сети и находятся уравнения, соответствующие редуцированной сети [16].

Раздельные BDDI- и Bool-минимизации для выделенных подсистем системы булевых функций (либо для отдельных функций системы, когда подсистема состоит из одной функции) заключается в нахождении своей перестановки переменных разложения Шеннона для каждой из подсистем функций, в то время как при BDDI- и Bool-минимизациях, используемых в данной работе, находится одна и та же перестановка

переменных разложения для всех функций выделенной подсистемы. Таким образом, подсистемы минимизируются раздельно, однако функции каждой отдельной подсистемы минимизируются совместно. Выделение подсистем осуществляется на основе блочного покрытия исходной системы ДНФ булевых функций.

Блочное покрытие системы ДНФ булевых функций. Пусть (T^x, B^f) – пара матриц, задающая матричную форму системы ДНФ булевых функций $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = (f^1(\boldsymbol{x}),\ldots, f^m(\boldsymbol{x}))$, $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2,\ldots, x_n)$, где T^x – троичная матрица, задающая общие элементарные конъюнкции; B^f – булева матрица, единичные элементы которой отмечают вхождения элементарных конъюнкций в ДНФ функций [15]. Система ДНФ

$$
\begin{aligned}
f^1 &= x_1\bar{x}_2\bar{x}_3x_4 \vee x_2x_3\bar{x}_5 \vee \bar{x}_1x_4x_5\,;\\
f^2 &= x_5x_6\bar{x}_7\bar{x}_8\bar{x}_9 \vee \bar{x}_4x_5\bar{x}_6x_8x_9x_{10} \vee x_4x_5x_8\,;\\
f^3 &= x_5x_6\bar{x}_7\bar{x}_8\bar{x}_9 \vee \bar{x}_4x_5\bar{x}_6x_8x_9x_{10} \vee x_1\bar{x}_2\bar{x}_4x_5 \vee x_2x_3\bar{x}_5 \vee \bar{x}_1x_4x_5\,;\\
f^4 &= x_5x_6\bar{x}_7\bar{x}_8\bar{x}_9 \vee \bar{x}_4x_5\bar{x}_6x_8x_9x_{10} \vee \bar{x}_1\bar{x}_2x_8x_{10} \vee x_1\bar{x}_8x_{10} \vee x_4x_5x_8\,;\\
f^5 &= x_2x_8\bar{x}_9 \vee x_1\bar{x}_8x_{10}\,;\\
f^6 &= x_1x_2\bar{x}_8x_9x_{10} \vee \bar{x}_1\bar{x}_2x_8x_{10} \vee x_2x_8\bar{x}_9
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

задается парой матриц (T^x, B^f), приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Система ДНФ булевых функций

Table 1

DNF system of Boolean functions

Номер строки	Троичная матрица T^x	Булева матрица B^f
	$x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6\ x_7\ x_8\ x_9\ x_{10}$	$f^1 f^2 f^3 f^4 f^5 f^6$
1	1 1 - - - - - 0 1 1	0 0 0 0 0 1
2	- - - - 1 1 0 0 0 -	0 1 1 1 0 0
3	- - - 0 1 0 - 1 1 1	0 1 1 1 0 0
4	0 0 - - - - - 1 - 1	0 0 0 1 0 1
5	1 0 - 0 1 - - - - -	1 0 1 0 0 0
6	- 1 1 - 0 - - - - -	1 0 1 0 0 0
7	- 1 - - - - - 1 0 -	0 0 0 0 1 1
8	1 - - - - - - 0 - 1	0 0 0 1 1 0
9	0 - - 1 1 - - - - -	1 0 1 0 0 0
10	- - - 1 1 - - 1 - -	0 1 0 1 0 0
Число литералов	81	
Площадь	160	

Число n переменных равно 10 ($n = 10$), число функций $m = 6$, ДНФ заданы на $k = 10$ общих элементарных конъюнкциях, число d операторов дизъюнкции в (3) равно 15 ($d = 15$). Площадь $Q(T^x, B^f)$ пары матриц будем вычислять по следующей формуле и выражать в числе бит:

$$Q(T^x, B^f) = (n + m)k.$$

Рассмотрим систему ДНФ, каждая элементарная конъюнкция которой включает в себя не более t литералов. Это значит, что в каждой строке троичной матрицы T^x находится не более t определенных 0, 1 элементов (остальные элементы равны «–»). Рассмотрим пару подматриц (T_{H_i}, B_{H_i}), где T_{H_i} – строчная (образованная некоторыми

строками матрицы T^x) подматрица матрицы T^x; B_{H_i} – подматрица матрицы B^f, заданная на том же подмножестве строк, что и T_{H_i}. Назовем пару (T_{H_i}, B_{H_i}) блоком H_i. Множество $\{H_1,\ldots, H_v\} = \{(T_{H_1}, B_{H_1}),\ldots,(T_{H_v}, B_{H_v})\}$ блоков назовем блочным дизъюнктивным покрытием (или блочным покрытием) пары матриц (T^x, B^f), если каждый единичный элемент матрицы B^f входит только в одну из подматриц B_{H_i}, а каждая строка матрицы T^x входит хотя бы в одну из подматриц T_{H_i}, $i = 1,\ldots,v$. Легко видеть, что пара (T_{H_i}, B_{H_i}) задает соответствующую систему ДНФ булевых функций. Рассмотрим три пары подматриц (три блока H_1, H_2, H_3), заданных в табл. 2–4, образующих блочное покрытие системы ДНФ из табл. 1. Блочному покрытию соответствует логическая схема (рисунок). В табл. 2–4 используется текстовая запись логических уравнений для BDDI- и Bool-представлений, при этом функция f_1^4 записана как f41, аналогично для функций f_1^3, f_2^3, f_2^4.

Блок H_1 имеет площадь 32 бит, блок H_2 – 27 бит, блок H_3 – 21 бит. Суммарная площадь трех блоков составляет 80 бит, что в два раза меньше площади (160 бит) системы ДНФ, заданной в табл. 1. Блочное покрытие позволяет сокращать суммарную площадь блоков и уменьшает число входных переменных блоков по сравнению с исходным (одноблочным) заданием системы ДНФ.

Таблица 2

Формы задания подсистемы булевых функций блока H_1

Table 2

Forms for specifying the Boolean function subsystem of block H_1

Номер строки	Система ДНФ		BDDI-представление	Bool-представление
	Троичная матрица T_{H_1}	Булева матрица B_{H_1}		
	$x_1 x_2 x_8 x_9 x_{10}$	$f_1^4 f^5 f^6$		

1
4
7
8
	1 1 0 1 1
	0 0 1 - 1
	- 1 1 0 -
	1 - 0 - 1
		0 0 1
		1 0 1
		0 1 1
		1 1 0
			f5=^x10*s1+x10*s2;
			f6=^x10*s1+x10*s4;
			f41=x10*s0;
			s4=^x8*s10+x8*s11;
			s2=^x8*x1+x8*s5;
			s0=^x8*x1+x8*s9;
			s1=x8*s5;
			s9=^x1*^x2;
			s11=^x1*s14+x1*s5;
			s10=x1*s12;
			s14=^x2+x2*^x9;
			s5=x2*^x9;
			s12=x2*x9;
				f41=W8+W9;
				W8=x8*W10;
				W9=^x8*W17;
				f5=W13+W9;
				W13=x8*W15;
				f6=W18+W19;
				W18=x8*W20;
				W19=^x8*W22;
				W22=x2*W23;
				W10=^x2*W25;
				W15=x2*^x9;
				W20=W15+W10;
				W17=x1*x10;
				W23=x1*W33;
				W25=^x1*x10;
				W33=x10*x9;

Число литералов	25		39	32
Площадь	32		–	–

Таблица 3

Формы задания подсистемы булевых функций блока H_2

Table 3

Forms for specifying the Boolean function subsystem of block H_2

Номер строки	Система ДНФ		BDDI-представление	Bool-представление
	Троичная матрица T_{H_2}	Булева матрица B_{H_2}		
	$x_4\,x_5\,x_6\,x_7\,x_8\,x_9$	$f^2\,f_1^3\,f_2^4$		

2
3
10
	- 1 1 0 0 0
	0 1 0 - 1 1
	1 1 - - 1 -
		1 1 1
		1 1 1
		1 0 1
			f2=s14;
			s14=x5*s0;
			f42=s14;
			f31=x5*s1;
			s1=^x4*s3+x4*s4;
			s0=^x4*s3+x4*s6;
			s4=^x8*s7;
			s6=^x8*s7+x8;
			s3=^x8*s7+x8*s9;
			s9=^x6*x9;
			s7=x6*s11;
			s11=^x9*^x7;
				f2=W9+W10;
				W9=x8*W11;
				W10=^x8*W13;
				f31=W14+W10;
				W14=x8*W25;
				f42=W9+W10;
				W11=W24+W25;
				W24=x4*x5;
				W25=^x4*W28;
				W13=^x9*W37;
				W28=x9*W42;
				W42=x5*^x6;
				W37=x5*W48;
				W48=^x7*x6;

Число литералов	36		29	28
Площадь	27		–	–

Таблица 4

Формы задания подсистемы булевых функций блока H_3

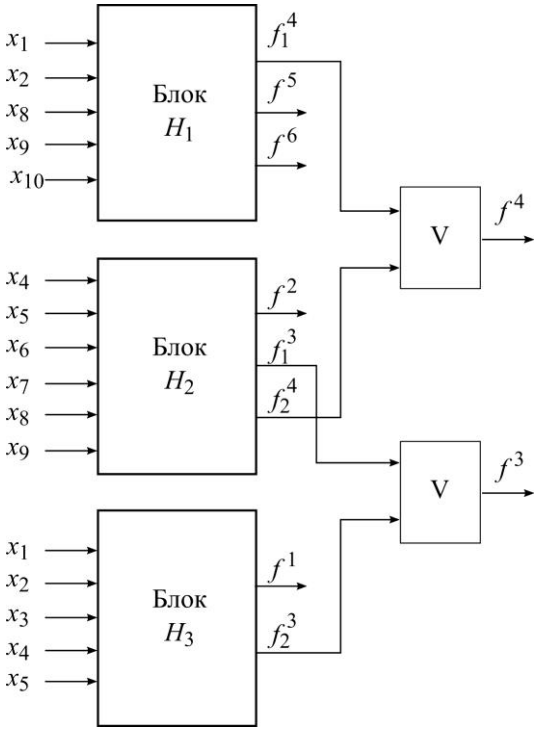
Table 4

Forms for specifying the Boolean function subsystem of block H_3

Номер строки	Система ДНФ		BDDI-представление	Bool-представление
	Троичная матрица T_{H_3}	Булева матрица B_{H_3}		
	$x_1\,x_2\,x_3\,x_4\,x_5$	$f^1\,f_2^3$		

5
6
9
	1 0 - 0 1
	- 1 1 - 0
	0 - - 1 1
		1 1
		1 1
		1 1
			f41=s13;
			s13=^x1*s0+x1*s1;
			f32=s13;
			s1=^x4*s4+x4*s5;
			s0=^x4*s5+x4*s7;
			s5=^x5*s8;
			s7=^x5*s8+x5;
			s4=^x5*s8+x5*^x2;
			s8=x2*x3;
				f41=W7+W8;
				W7=x5*W9;
				W8=^x5*W11;
				f32=W7+W8;
				W9=W17+W18;
				W17=x1*W19;
				W18=^x1*x4;
				W19=^x2*^x4;
				W11=x2*x3;

Число литералов	20		25	18
Площадь	21		–	–



Логическая схема, соответствующая блочному покрытию
(см. табл. 2–4) системы ДНФ
Logic diagram corresponding to block coverage
(Tables 2–4) of DNF system

Разреженные системы ДНФ и предлагаемый подход. Под разреженностью α троичной матрицы T^x будем понимать отношение числа неопределенных элементов «–» к числу всех элементов этой матрицы и выражать это отношение в процентах. Например, троичная матрица T^x (см. табл. 1) содержит 62 неопределенных значения «–», общее число элементов матрицы T^x равно 100 (матрица состоит из 10 столбцов и 10 строк), следовательно, α = 62 %.

Под разреженностью β булевой матрицы B^f будем понимать долю ее нулевых элементов, выраженную в процентах. В булевой матрице B^f (см. табл. 1) число нулевых элементов равно 39, следовательно, β = 39/60 = 0,65, что составляет 65 %. Чем большее значение имеют параметры α и β, тем более разреженной является матричная форма системы ДНФ.

Предлагаемый способ схемной реализации разреженных систем ДНФ состоит в переборе блочных покрытий и минимизации подсистем функций блоков в классе ДНФ либо в классе многоуровневых BDDI- либо Bool-представлений. Перебор блочных покрытий предлагается осуществлять, задавая каждый раз ограничение на число входных переменных блоков покрытия, так как вычислительная сложность минимизации представлений подсистем функций во многом определяется размерностью булева пространства – числом входных переменных блока. При этом минимизация рассматриваемых алгебраических форм подсистем булевых функций может выполняться как для функций по отдельности (раздельная минимизация), так и для всех функций вместе – совместная минимизация всех функций рассматриваемой подсистемы. Ограничение на число входных переменных блока при блочном покрытии должно быть больше либо равно числу литералов в самой «длинной» (состоящей из максимального числа литера-

лов) элементарной конъюнкции, входящей в систему ДНФ. Отличительная особенность разреженных систем ДНФ состоит в том, что элементарные конъюнкции являются «короткими», т. е. включают в себя мало литералов по сравнению с общим числом n аргументов, от которых зависят все функции системы.

Исходные данные для экспериментов. Примеры систем ДНФ (табл. 5) – это разреженные системы ДНФ (Combinational Multi-Level Examples), взятые из библиотеки примеров LGSynth91 и переведенные в матричные формы систем ДНФ булевых функций. Пример i2c взят из библиотеки примеров «The EPFL Combinational Benchmark Suite» (http://lsi.epfl.ch/benchmarks). Основными критериями выбора примеров являлись практическая размерность (десятки аргументов и функций) и возможно бóльшая разреженность матричных заданий систем ДНФ.

Функциональные описания примеров C8, DALU, LAL, PM1, SCT, TTT2, X1, X3, X4 не содержат инверсий литералов входных переменных, т. е. троичные матрицы T^x для этих примеров содержат только 1 и «–». В табл. 5 используются следующие обозначения: n – число аргументов; m – число функций; k – число общих элементарных конъюнкций; d – число дизъюнкций в системе ДНФ булевых функций; α – разреженность (в процентах) троичной матрицы T^x; β – разреженность (в процентах) булевой матрицы B^f.

Рассмотрим матричную форму примера Apex5. Троичная матрица T^x включает в себя 117 столбцов (переменных) и 1227 строк (элементарных конъюнкций), площадь этой матрицы 117 × 1227=143 559, матрица T^x содержит 136 453 неопределенных элементов «–», разреженность этой матрицы 136 453/143 559 = 0,95, т. е. 95 %. Булева матрица B^f включает в себя 88 столбцов (функций) и 1227 строк, площадь этой матрицы 88 × 1227 = 107 976, данная матрица содержит 101 759 нулевых элементов, разреженность этой матрицы 101 759/107 976 = 0,943, т. е. 94,3 %. Среди рассмотренных пример Alu4 является наименее разреженным: доли неопределенных элементов в троичной матрице T^x и нулевых элементов в булевой матрице B^f меньше половины.

Таблица 5

Параметры разреженных систем ДНФ булевых функций

Table 5

Parameters of sparse DNF systems of Boolean functions

Имя примера	n	m	k	d	α	β
C8	28	18	70	103	89,5	78,0
DALU	75	16	194	1145	94,0	58,7
LAL	26	19	117	67	83,8	71,8
PM1	16	13	42	27	83,6	70,0
SCT	19	15	64	76	98,9	63,3
TTT2	24	21	222	203	80,7	71,9
Alu4	14	8	1 028	1 020	45,2	40,3
Apex5	117	88	1 227	1 142	95,0	94,3
I2c	147	142	1 357	1 251	98,6	97,8
X1	51	35	324	289	87,0	78,0
X3	135	99	915	523	92,4	93,9
X4	94	71	371	277	94,5	90,8

Эксперименты. Сначала (кроме эксперимента 1) выполнялась программа поиска лучшего блочного покрытия системы ДНФ булевых функций. При этом осуществлялось последовательное нахождение блочных покрытий с заданным ограничением на

число p входов отдельного блока. Критериями выбора лучшего блочного покрытия при переборе покрытий выбраны: суммарная площадь элементов сети (систем ДНФ), соответствующих блочному покрытию; суммарное число литералов булевых переменных в элементах блочного покрытия.

Если критерий выбора лучшего блочного покрытия – площадь, то перебор блочных покрытий осуществлялся быстро, так как для блоков покрытия не применялись процедуры минимизации. Если критерием выбора лучшего покрытия – число литералов, то блоки покрытия минимизировались в классе ДНФ (выполнялась двухуровневая минимизация) либо для каждого из элементов сети выполнялась BDDI-минимизация и после выполнения процедур минимизации подсчитывалось число литералов.

Для обоснования выбора блочного покрытия по критерию минимальности суммарного числа литералов построены графики зависимости площади схемы из библиотечных КМОП-элементов от числа литералов в алгебраических формульных BDDI- либо Bool-представлениях систем функций. Такие графики линейной зависимости площадей схем из КМОП-элементов от числа вершин графа BDDI либо от суммарного числа литералов в BDDI-представлениях приведены в [17]. После того как лучшее (по числу литералов или по площади) блочное покрытие выбрано, выполняли заключительную BDDI-минимизацию либо Bool-минимизацию элементов сети. В двух экспериментах полученное минимизированное BDDI-представление дополнительно минимизировали еще и в классе булевых сетей – выполняли Bool-минимизацию (эксперименты 7 и 11).

На заключительном этапе экспериментов после логической минимизации описания представлений систем функций конвертировали в VHDL-описания и подавали на вход синтезатора LeonardoSpectrum – выполнялся синтез логических схем в библиотеке проектирования заказных КМОП СБИС и выдавались отчеты о суммарной площади (Area) элементов схемы и отчеты о максимальной задержке (Delay). Синтезатор LeonardoSpectrum [18] перерабатывает входное описание, выполняет свою логическую минимизацию, получает внутреннее описание, по которому и синтезируется схема. Библиотекой синтеза являлась библиотека проектирования заказных цифровых КМОП СБИС, состав библиотеки приведен в работе [12].

Проведено одиннадцать экспериментов, различающихся критериями выбора лучшего покрытия, программами минимизации, выполняемыми при переборе покрытий, и программами заключительной минимизации блоков выбранного покрытия (табл. 6). Например, BDDI-минимизация блоков найденного блочного покрытия используется в экспериментах 5, 7, 9, 11, а Bool-минимизация – в экспериментах 2, 3, 6, 7, 10, 11.

BDDI-минимизацию выполняли для матричных форм, Bool-минимизацию – для логических уравнений, задающих те же системы функций. Программу блочного покрытия выполняли только для матричных представлений, обработку многоблочных логических сетей осуществляли с помощью стратегий системы логической оптимизации FLC2 [19]. Перечислим программы системы FLC2, участвующие в экспериментах. Перебор блочных покрытий осуществляли программой AutoDecomp. BDDI-минимизацию систем ДНФ выполняли с помощью программы BDD_Builder [16], Bool-минимизацию – с помощью модификации программы BoolNet_Opt [16]. Совместную минимизацию систем булевых функций в классе ДНФ выполняли программой Minim [20].

Для решения задачи нахождения блочного покрытия системы ДНФ использовали программу RAZ_Area [21]. В реализованном варианте программы RAZ_Area блочного покрытия предполагается, что каждый единичный элемент матрицы B^f покрывается только одной из подматриц B_H. Входным параметром программы RAZ_Area является число входных переменных блока покрытия p. Для примеров систем ДНФ, использованных в экспериментах, диапазоны перебираемых входных переменных блоков приведены в табл. 7.

Таблица 6

Структура экспериментов

Table 6

Structure of experiments

Эксперимент	Выбор блочного покрытия				Заключительная минимизация блоков покрытия		
	Минимизация блоков покрытия		Критерий выбора				
	BDDI	ДНФ	Суммарное число литералов	Площадь блочного покрытия	BDDI	ДНФ	Bool
1	–	–	–	–	–	–	–
2	+	–	+	–	–	–	+
3	–	+	+	–	–	+	+
4	–	–	–	+	–	–	–
5	–	–	–	+	+	–	–
6	–	–	–	+	–	–	+
7	–	–	–	+	+	–	+
8	–	–	+	–	–	–	–
9	–	–	+	–	+	–	–
10	–	–	+	–	–	–	+
11	–	–	+	–	+	–	+

Примечание: «+» – выполняется соответствующая процедура минимизации либо используются критерии выбора лучшего покрытия (при переборе блочных покрытий); «–» – соответствующая процедура либо указанный в столбце критерий выбор не используется; в эксперименте 1 разбиения на блоки не было, поэтому во всех столбцах «–».

Таблица 7

Перебор числа *p* входных переменных блоков покрытия программой AutoDecomp

Table 7

Enumerating the number *p* of input variables blocks covered with AutoDecomp program

Имя примера	Число входных переменных		
	Начало	Шаг	Конец
C8	12	1	25
DALU	20	1	70
LAL	14	1	23
PM1	8	1	14
SCT	10	1	18
TTT2	15	1	21
Alu4	14	1	14
Apex5	25	1	50
I2c	25	5	75
X1	25	1	45
X3	25	1	75
X4	15	1	50

Эксперимент 1. Для систем функций, заданных логическими уравнениями, логическая оптимизация не выполнялась, исходные описания сразу конвертировались в VHDL-описания.

В экспериментах 2–11 в качестве исходной информации применяли матричную форму разреженной системы ДНФ булевых функций.

Эксперимент 2. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию числа литералов. При переборе покрытий для элементов каждого блочного покрытия выполнялась BDDI-минимизация, для всех элементов выбранного лучшего блочного покрытия выполнялась заключительная Bool-минимизация.

Эксперимент 3. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию числа литералов. При переборе покрытий для элементов каждого блочного покрытия выполнялась совместная минимизация системы функций блока в классе ДНФ, минимизированные ДНФ подсистем функций блоков выбранного блочного покрытия записывались в виде логических уравнений и к ним применялась заключительная Bool-минимизация.

Эксперимент 4. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию минимальной суммарной площади элементов сети.

Эксперимент 5. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию минимальной суммарной площади элементов сети. Затем элементы выбранного лучшего покрытия подвергались заключительной BDDI-минимизации.

Эксперимент 6. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию минимальной суммарной площади элементов сети. Затем элементы выбранного лучшего покрытия подвергались заключительной Bool-минимизации.

Эксперимент 7. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию минимальной суммарной площади элементов сети. Затем элементы выбранного лучшего покрытия подвергались двойной минимизации: сначала BDDI-минимизации, затем полученное минимизированное BDDI-представление подвергалось Bool-минимизации.

Эксперимент 8. Для систем функций, заданных в матричной форме, находилось лучшее блочное покрытие по критерию минимального суммарного числа литералов элементов покрытия.

Эксперимент 9. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию минимального суммарного числа литералов элементов покрытия. Затем элементы выбранного лучшего покрытия подвергались заключительной BDDI-минимизации.

Эксперимент 10. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию минимального суммарного числа литералов элементов покрытия. Затем элементы выбранного лучшего покрытия подвергались заключительной Bool-минимизации.

Эксперимент 11. Нахождение лучшего блочного покрытия по критерию минимального суммарного числа литералов элементов покрытия, затем элементы выбранного лучшего покрытия подвергались двойной минимизации: сначала BDDI-минимизации. Затем полученное минимизированное BDDI-представление подвергалось Bool-минимизации.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Для системы ДНФ функций рассматриваемого примера (см. табл. 1) результаты экспериментов для заказных СБИС даны в табл. 8. Обозначения, используемые в табл. 8–15, следующие: Z – число литералов в алгебраическом задании системы булевых функций; S_{cover} – суммарная площадь элементов (систем ДНФ) блочного покрытия; *Area* – суммарная площадь элементов схемы в условных единицах; *Delay* – временная задержка схемы, нс; p – число входов блока;

r – число блоков после разбиения системы функций на подсистемы (случай $r = 1$ соответствует совместной реализации системы); # – улучшение параметра площади либо задержки по сравнению с базовым решением; * – лучшее решение по всем экспериментам.

Таблица 8

Результаты экспериментов 1, 2, 4 для системы ДНФ булевых функций

Table 8

Results of experiments 1, 2, 4 for the DNF system of Boolean functions

Эксперимент 1 (базовое решение)		Эксперимент 2				Эксперимент 4			p
Исходное описание		Выбор лучшего покрытия	Заключительная Bool-минимизация блоков			Блочное покрытие (без оптимизации блоков)			
Area	*Delay*	*Z*	*Z*	*Area*	*Delay*	S_{cover}	*Area*	*Delay*	
8 643	2,74	93	78	*#8 493	#2,64	80	8 643	*#2,63	6
		104	–	–	–	141	–	–	7
		107	–	–	–	140	–	–	8

Таблица 9

Результаты эксперимента 1

Table 9

Results of experiment 1

Имя примера	Схемная реализация (базовые решения)		
	Z	*Area*	*Delay*
C8	204	*21 500	*2,20
DALU	1 404	106 249	10,79
LAL	529	*26 343	3,80
PM1	124	*10 764	2,58
SCT	253	20 406	3,20
TTT2	1 263	43 652	*3,85
Alu4	7 875	487 848	9,94
Apex5	7 106	*188 559	8,77
I2c	7 112	280 601	9,12
X1	2 148	67 546	*3,99
X3	5 045	203 659	6,75
X4	2 649	*95 781	5,38
Число лучших базовых решений		5	3

Таблица 10

Результаты эксперимента 2

Table 10

Results of experiment 2

Имя примера	Выбранные параметры блочного покрытия			Схемная реализация		
	p	*Z*	*r*	*Z*	*Area*	*Delay*
C8	17	213	18	241	22 275	#2,02
DALU	45	1 234	16	1 054	#50 979	#4,89
LAL	17	536	19	497	26 829	#3,73
PM1	10	172	14	147	10 931	#2,38
SCT	13	370	17	338	#19 926	#3,18
TTT2	21	827	10	810	48 434	4,27
Alu4	14	3 469	8	3 504	*#313 172	#7,72
Apex5	35	5 623	95	6 427	284 022	#8,21
I2c	75	5 774	81	4 459	#257 617	9,97
X1	45	1 249	18	1 555	71 848	4,42
X3	39	3 598	120	3 883	212 598	8,35
X4	33	2 748	50	2 970	123 156	5,80
Число улучшенных базовых решений					4	7

Таблица 11

Результаты эксперимента 3

Table 11

Results of experiment 3

Имя примера	Выбранные параметры блочного покрытия			Схемная реализация		
	p	*Z*	*r*	*Z*	*Area*	*Delay*
C8	17	204	18	258	22 091	2,20
DALU	45	1 404	16	1 154	#54 595	#6,38
LAL	22	531	18	579	27 710	#3,25
PM1	12	126	12	153	11 171	#2,49
SCT	17	253	7	394	29 552	5,32
TTT2	21	1 263	10	684	*#38 898	4,19
Alu4	14	5 167	8	3 758	#352 544	#8,58
Apex5	31	7 051	101	6 272	237 312	9,52
I2c	65	5 425	76	4 639	*#251 033	9,22
X1	30	1 990	22	1 541	75 503	5,86
X3	29	5 084	122	4 144	229 360	10,60
X4	50	2 659	37	3 172	129 808	8,47
Число улучшенных базовых решений					4	4

Таблица 12

Результаты экспериментов 4, 5 выбора блочного покрытия по площади блоков

Table 12

Results of experiments 4, 5 – selection of block coverage based on block area

Имя примера	Выбранные параметры блочного покрытия (для экспериментов 4, 5, 6, 7)				Эксперимент 4			Эксперимент 5		
					Схемная реализация					
	p	*Z*	*r*	S_{cover}	*Z*	*Area*	*Delay*	*Z*	*Area*	*Delay*
C8	12	208	21	402	208	22 220	2,36	266	22 169	2,20
DALU	26	1 445	34	4 538	1 445	#54 282	*#4,28	1 315	#65 526	#5,29
LAL	14	541	24	1 247	541	27 214	#3,53	588	27 710	*#3,25
PM1	8	137	18	283	137	11 099	#2,44	196	11 127	*#2,20
SCT	10	269	23	610	269	#*18 615	*#2,75	397	#19 301	#2,93
TTT2	16	1 281	16	3 172	1 281	45 399	4,38	956	51 609	4,64
Alu4	14	7 875	8	14 378	7 875	507 507	#9,67	3 469	#373 163	10,53
Apex5	25	7 334	238	15 713	7 334	195 534	9,09	8 277	236 904	#8,14
I2c	25	7 218	104	22 867	7 218	295 584	#8,88	5 884	#277 426	#7,06
X1	27	2 173	24	6 501	2 173	#67 364	#3,94	1 638	81 038	5,23
X3	26	5 142	157	12 149	5 142	218 384	#6,69	4 370	*#194 418	*#5,19
X4	17	2 776	76	5 119	2 776	96 579	5,41	3 354	108 821	#5,16
Число улучшенных базовых решений						3	8	–	5	8

Таблица 13

Результаты экспериментов 6, 7 выбора блочного покрытия по площади блоков

Table 13

Results of experiments 6, 7 – selection of block coverage based on block area

Имя примера	Эксперимент 6			Эксперимент 7		
	Схемная реализация					
	Z	*Area*	*Delay*	*Z*	*Area*	*Delay*
C8	294	21 734	2,20	336	21 656	2,20
DALU	1 219	#52 642	#5,21	1 298	#50 421	#4,38
LAL	593	27 582	#3,56	647	28 090	4,10
PM1	195	11 188	#2,44	215	10 881	#2,38
SCT	400	#19 926	#3,18	434	#19 301	#2,93
TTT2	998	52 753	4,36	1 045	55 939	5,26
Alu4	3 714	#345 329	*#8,30	3 440	#340 492	10,19
Apex5	7178	300 388	7,58	9 130	285 685	#7,11
I2c	5 682	283 944	#7,79	6 982	#279 000	#7,54
X1	1 607	71 257	4,94	1 731	72 646	4,93
X3	4 352	209 780	#6,02	4 614	206 912	#6,12
X4	2 776	96 579	5,41	3 649	114 954	#5,05
Число улучшенных базовых решений		3	7	–	4	**7**

Таблица 14

Результаты экспериментов 8, 9 выбора блочного покрытия по числу литералов

Table 14

Results of experiments 8, 9 – selection of block coverage by the number of literals

Имя примера	Выбранные параметры блочного покрытия (для экспериментов 8, 9, 10, 11)				Эксперимент 8			Эксперимент 9		
					Схемная реализация					
	p	*Z*	*r*	S_{cover}	*Z*	*Area*	*Delay*	*Z*	*Area*	*Delay*
C8	17	204	18	465	204	22 460	2,91	213	22 460	2,20
DALU	45	1 404	16	7 034	1 404	#51 961	#4,45	1243	#67 033	#6,22
LAL	22	531	18	1 357	531	27 180	#3,53	546	27 710	*#3,25
PM1	12	126	12	353	126	11 099	#2,44	178	11 947	#2,38
SCT	17	253	7	844	253	#19 831	#3,15	385	#20 216	3,42
TTT2	21	1 263	10	3 594	1263	44 930	4,38	827	63 015	5,64
Alu4	14	7 875	8	14 378	7 875	507 507	#9,67	3 469	#373 163	10,53
Apex5	35	7 129	95	20 689	7 129	197 253	*#6,83	5623	212 386	#7,83
I2c	60	7 143	76	27 186	7 143	294 222	#7,51	5884	317 184	#8,58
X1	44	2 152	18	9 516	2 152	*#66 458	3,99	1681	83 237	4,54
X3	29	7 190	122	13 511	7 190	226 743	7,34	4344	204 189	#5,69
X4	50	2 659	37	7 439	2 659	100 501	*#4,00	3134	136 760	7,37
Число улучшенных базовых решений						3	8	–	3	6

Таблица 15

Результаты экспериментов 10, 11 выбора блочного покрытия по числу литералов

Table 15

Results of experiments 10, 11 – selection of block coverage by the number of literals

Имя примера	Эксперимент 10			Эксперимент 11		
	Схемная реализация					
	Z	*Area*	*Delay*	*Z*	*Area*	*Delay*
C8	256	22 091	2,20	282	22 778	2,59
DALU	1 144	*#49 082	#5,22	1 154	#53 099	#5,32
LAL	541	27 582	3,56	619	27 710	*#3,25
PM1	126	11 099	2,44	189	11 082	2,38
SCT	420	28 084	4,12	400	#20 149	3,18
TTT2	874	46 749	4,76	902	39 345	4,50
Alu4	3 714	#345 329	8,30	3 440	#340 492	10,19
Apex5	6 512	277 226	9,33	6 672	197 220	8,41
I2c	4 939	#275 021	*#7,01	6 256	#275 362	#8,35
X1	1 686	69 064	4,42	1 651	73 042	5,89
X3	4 338	242 518	8,94	4 336	#202 163	5,22
X4	3 194	123 776	7,69	3 582	156 391	7,12
Число улучшенных базовых решений		3	2	–	5	3

В эксперименте 2 (см. табл. 8) строились три блочных покрытия (для p = 6, 7, 8), для каждого из них выполнялась BDDI-минимизация, выбиралось покрытие (для p = 6) с меньшим числом (93) литералов, в результате проведенной заключительной Bool-минимизации блоков выбранного покрытия число литералов сокращалось до 78, результирующая логическая схема имела площадь 8493 усл. ед. и задержку 2,46 нс.

В эксперименте 4 выбиралось покрытие с наименьшей суммарной площадью блоков (S_{cover} = 80), для выбранного покрытия выполнялся синтез схемы, при этом никакой оптимизации блоков не проводилось. В результате получена схема площадью 8493 усл. ед. и задержкой 2,63 нс. Если сравнивать параметры трех полученных схем, то в эксперименте 2 получена схема, площадь которой наименьшая (символ *) и площадь которой была меньше, чем у базового решения (символ #). В эксперименте 4 получена схема с наименьшей (для данных трех экспериментов) задержкой (символ *) и задержка этой схемы меньше, чем у базового решения, поэтому значение 2,63 в табл. 8 сопровождается двумя символами «*#».

Проведенные эксперименты показывают, что в семи примерах систем ДНФ из двенадцати (см. табл. 7) применение предлагаемого подхода позволяет получить лучшее решение по площади схем, чем непосредственная реализация исходных (неминимизированных) описаний систем ДНФ, улучшение задержки оказалось возможным в девяти случаях.

Эксперименты 2 и 3, в которых после построения каждого блочного покрытия для каждого блока проводилась BDDI-минимизация (эксперимент 2) или совместная минимизация в классе ДНФ (эксперимент 3), являются трудоемкими, особенно когда требуется BDDI-минимизация блоков с большим числом входных переменных. Поэтому сокращение времени нахождения лучшего покрытия возможно либо при ограничении числа входных переменных блоков, либо (как это сделано в экспериментах 4 и 8) при более простом выборе лучшего покрытия. В эксперименте 4 лучшее покрытие выбиралось по критерию меньшей суммарной площади блоков, в эксперименте 8 – по меньшей сумме числа литералов в блоках покрытия.

Отметим, что время BDDI-минимизации не ограничивалось в отличие от Bool-минимизации, когда один блок обрабатывался 1 мин. Улучшение качества решений (площади схемы), получаемых Bool-минимизацией, возможно при увеличении времени обработки одного блока. Например, увеличение времени обработки одного блока до 5 мин (вместо 1 мин) при Bool-минимизации в эксперименте 6 позволило существенно уменьшить площадь только для двух примеров Apex5, Dalu. При оптимизации в течение 1 мин для одного блока для примера Apex5 получена площадь 300 388 усл. ед., при времени обработке в течение 5 мин площадь уменьшилась и составила 284 474, а для примера Dalu при выделенной 1 мин для обработки одного блока площадь равна 52 642, а при 5 мин площадь стала меньше и равна 49 026.

Эксперименты 4 и 8 показывают, что при выполнении только одного этапа (блочного покрытия) уже возможно уменьшение площади схемы и увеличение ее быстродействия по сравнению с базовым решением, в котором не ведется предварительная оптимизация. Оценивая результаты экспериментов 4–11, можно сделать вывод о том, что перебор блочных покрытий с различным числом входов и многоуровневая либо двухуровневая минимизация блоков для каждого перебираемого блочного покрытия – трудоемкая задача, особенно когда блоки имеют большое число входных переменных.

Таким образом, для схемной реализации разреженных систем ДНФ целесообразно находить лучшее блочное покрытие, быстро оценивая покрытие по общей площади се-

ти либо по суммарному числу литералов в сети, а затем проводить однократную (и менее трудоемкую) BDDI- или Bool-минимизацию блоков найденного покрытия.

Выполнение дополнительной Bool-минимизации для уже минимизированных BDDI-представлений блоков позволяет улучшить решение по площади схемы (см. табл. 13). При этом увеличение выделяемого времени для Bool-минимизации ведет к перебору большего числа перестановок входных переменных блоков покрытия и позволяет сокращать число литералов и, следовательно, сокращать площадь схемы. Экспериментально установлено, что сокращение времени BDDI-минимизации возможно при сравнении кофакторов, заданных не в виде полиномов Жегалкина, а в виде матричных ДНФ-описаний. Сравнение полиномов Жегалкина и нахождение инверсных кофакторов эффективно для ограниченной размерности входных переменных соответствующих булевых функций (кофакторов). Если же говорить о временных задержках результирующих логических схем из КМОП-элементов, то в результате применения блочного покрытия и оптимизации блоков на основе многоуровневых представлений задержки получаемых схем меньше, чем задержки схем, соответствующих базовым решениям.

Улучшение результатов многоуровневой минимизации функций блока (T_{H_i}, B_{H_i}) возможно при реализации многократного покрытия единичного значения в матрице B^f несколькими подматрицами B_{H_i} с целью уменьшения числа различных ДНФ в блоке (T_{H_i}, B_{H_i}). Улучшение результатов – площадей и задержек – схемной реализации разреженных систем ДНФ возможно также при использовании комбинированных процедур [22] многоуровневой минимизации и для смешанных стратегий минимизации подсистем функций блоков, когда для различных блоков одного и того же покрытия применяется не одна и та же процедура (программа) минимизации, так сделано в проведенных экспериментах, а выбирается своя комбинированная процедура минимизации, позволяющая получать лучшее решение именно для этого блока. Кроме того, можно в качестве заключительной минимизации использовать совместную либо раздельную минимизацию систем функций в классе ДНФ. Все это открывает возможности для дальнейших исследований по схемной реализации не только разреженных систем ДНФ, но и других классов ДНФ большой размерности, например так называемых блочных систем ДНФ.

Заключение. Система FLC2 [19] включает в себя разнообразные программы логической минимизации различных форм представлений систем булевых функций. В FLC2 можно провести эффективную технологически независимую оптимизацию разреженных систем ДНФ, используя программы как блочного покрытия, так и блочного разбиения систем ДНФ, выделяя подсистемы функций, для которых целесообразно проводить совместную логическую минимизацию. После блочного разбиения либо покрытия системы ДНФ булевых функций для логической минимизации могут быть использованы представления проектных данных для блоков покрытия не только в виде бинарных диаграмм решений и булевых сетей, но и других структур данных.

Литература

1. ***Amarú L., Gaillardon P.-E., Mitra S., De Micheli G.*** New logic synthesis as nanotechnology enabler // Proceedings of the IEEE. 2015. Vol. 103. No. 11. P. 2168–2195. https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2460377

2. ***Amarú L. G.*** New data structures and algorithms for logic synthesis and verification. Cham: Springer, 2017. XVI, 156 p.

3. ***Soeken M., Amarú L. G., Gaillardon P.-E., De Micheli G.*** Optimizing majority-inverter graphs with functional hashing // 2016 Design, Automation & Test in Europe Conference and Exhibition (DATE). Dresden: IEEE, 2016. P. 1030–1035.

4. ***Soeken M., Amarú L. G., Gaillardon P.-E., De Micheli G.*** Exact synthesis of majority-inverter graphs and its applications // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2017. Vol. 36. No. 11. P. 1842–1855. https://doi.org/10.1109/TCAD.2017.2664059

5. ***Гуров С. И.*** Мажоритарная алгебра для синтеза комбинационно-логических схем. Обзор // Таврический вестник информатики и математики. 2020. № 2 (47). С. 39–60. EDN: CNJUKV.

6. ***Böttcher A., Kumm M.*** Towards globally optimal design of multipliers for FPGAs // IEEE Transactions on Computers. 2023. Vol. 72. No. 5. P. 1261–1273. https://doi.org/10.1109/TC.2023.3238128

7. ***Соловьев В. В.*** Проектирование на программируемых логических интегральных схемах быстрых компараторов большой разрядности // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2016. № 3. С. 198–205. EDN: WWZKPP.

8. ***Gorodecky D., Sousa L.*** Two-operand modular multiplication to small bit ranges // Advanced Boolean techniques: Selected papers from the 15th International Workshop on Boolean Problems / eds R. Drechsler, S. Huhn. Cham: Springer, 2023. P. 111–122. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28916-3_8

9. ***Solomko M., Tadeyev P., Nazaruk V., Khariv N.*** Optimal performance of 16-bit acyclic adders of binary codes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 3. No. 4 (99). P. 21–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168485

10. ***Mailhot F., Di Micheli G.*** Algorithms for technology mapping based on binary decision diagrams and on Boolean operations // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1993. Vol. 12. No. 5. P. 599–620. https://doi.org/10.1109/43.277607

11. ***Kaxiras S., Martonosi M.*** Idle-unit switching activity: clock gating // Computer architecture techniques for power-efficiency / S. Kaxiras, M. Martonosi. Williston, VT: Morgan & Claypool, 2008. P. 51–57.

12. ***Авдеев Н. А., Бибило П. Н.*** Автоматизированное проектирование цифровых операционных устройств с пониженным энергопотреблением // Программная инженерия. 2021. Т. 12. № 2. С. 63–73. https://doi.org/10.17587/prin.12.63-73. – EDN: VSVBVZ.

13. ***Шашков А. С.*** Проектирование цифровых систем с пониженным энергопотреблением с применением технологии UPF-описания подсистемы питания // Информатика. 2015. № 3 (47). С. 90–104. EDN: ZWZPJX.

14. ***Тарасов И. Е.*** ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 538 с.

15. ***Закревский А. Д.*** Логический синтез каскадных схем. М.: Наука, 1981. 416 с.

16. ***Бибило П. Н., Ланкевич Ю. Ю.*** Экспериментальное сравнение эффективности алгоритмов оптимизации BDD-представлений систем булевых функций // Программные продукты и системы. 2020. № 3. С. 449–463. EDN: SAITXW.

17. ***Бибило П. Н.*** Бинарные диаграммы решений в логическом проектировании. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2024. 560 с.

18. ***Бибило П. Н.*** Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL: StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 384 с.

19. ***Бибило 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 наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 4. С. 9–16. https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-4-9-16. – EDN: ZHOFRS.

20. ***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.

21. ***Кардаш С. Н.*** Построение блочных разбиений систем булевых функций на основе задачи покрытия булевых матриц // BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 17–18 мая 2023 г.): в 2 ч. Ч. 2. Минск: БГУИР, 2023. С. 326–330. EDN: OGQMZK.

22. ***Бибило П. Н., Ланкевич Ю. Ю., Романов В. И.*** Логическая минимизация многоуровневых представлений систем булевых функций // Информационные технологии. 2023. Т. 29. № 2. С. 59–71. https://doi.org/10.17587/it.29.59-71. – EDN: RGJEJU.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.02.2024 г.;
принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Бибило 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

Кардаш Сергей Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6), kardas77@gmail.com

Романов Владимир Ильич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6), rom@newman.bas-net.by

References

1. Amarú L., Gaillardon P.-E., Mitra S., De Micheli G. New logic synthesis as nanotechnology enabler. *Proceedings of the IEEE,* 2015, vol. 103, no. 11, pp. 2168–2195. https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2460377

2. Amarú L. G. *New data structures and algorithms for logic synthesis and verification.* Cham, Springer, 2017. xvi, 156 p.

3. Soeken M., Amarú L. G., Gaillardon P.-E., De Micheli G. Optimizing majority-inverter graphs with functional hashing. *2016 Design, Automation & Test in Europe Conference and Exhibition (DATE).* Dresden, IEEE, 2016, pp. 1030–1035.

4. Soeken M., Amaru L. G., Gaillardon P.-E., De Micheli G. Exact synthesis of majority-inverter graphs and its applications. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,* 2017, vol. 36, no. 11, pp. 1842–1855. https://doi.org/10.1109/TCAD.2017.2664059

5. Gurov S. I. Majority algebra for the synthesis of combinatorial logic schemes. Review. *Tavricheskiy vestnik informatiki i matematiki = Taurida Journal of Science Theory and Mathematics,* 2020, no. 2 (47), pp. 39–60. (In Russian). EDN: CNJUKV.

6. Böttcher A., Kumm M. Towards globally optimal design of multipliers for FPGAs. *IEEE Transactions on Computers,* 2023, vol. 72, no. 5, pp. 1261–1273. https://doi.org/10.1109/TC.2023.3238128

7. Salauyou V. V. Designing on FPGA and SoC high-performance binary comparators of a big dimensionality. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES),* 2016, no. 3, pp. 198–205. EDN: WWZKPP.

8. Gorodecky D., Sousa L. Two-operand modular multiplication to small bit ranges. *Advanced Boolean techniques: Selected papers from the 15th International Workshop on Boolean Problems,* eds R. Drechsler, S. Huhn. Cham, Springer, 2023, pp. 111–122. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28916-3_8

9. Solomko M., Tadeyev P., Nazaruk V., Khariv N. Optimal performance of 16-bit acyclic adders of binary codes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2019, vol. 3, no. 4 (99), pp. 21–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168485

10. Mailhot F., Di Micheli G. Algorithms for technology mapping based on binary decision diagrams and on Boolean operations. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,* 1993, vol. 12, no. 5, pp. 599–620. https://doi.org/10.1109/43.277607

11. Kaxiras S., Martonosi M. Idle-unit switching activity: clock gating. *Computer architecture techniques for power-efficiency,* by S. Kaxiras, M. Martonosi. Williston, VT, Morgan & Claypool, 2008, pp. 51–57.

12. Avdeev N. A., Bibilo P. N. Design of digital operational units with low power consumption. *Programmnaya ingeneria = Software Engineering,* 2021, vol. 12, no. 2, pp. 63-73. (In Russian). https://doi.org/10.17587/prin.12.63-73. – EDN: VSVBVZ.

13. Shashkov A. S. Design of low-power electronic systems using UPF power intent specification technology. *Informatika = Informatics,* 2015, no. 3 (47), pp. 90–104. (In Russian). EDN: ZWZPJX.

14. Tarasov I. E. *FPGA Xilinx. Hardware description languages VHDL and Verilog, CAD, design techniques.* Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2020. 538 p. (In Russian).

15. Zakrevskiy A. D. *Logic synthesis of cascade circuits.* Moscow, Nauka Publ., 1981. 416 p. (In Russian).

16. Bibilo P. N., Lankevich Yu. Yu. Experimental investigation of effectiveness of algorithms for minimizing BDD representations of Boolean function systems. *Programmnyye produkty i sistemy = Software and Systems*, 2020, no. 3, pp. 449–463. (In Russian). EDN: SAITXW.

17. Bibilo P. N. *Binary decision diagrams in logical design.* Moscow, URSS, LENAND Publ., 2024. 560 p. (In Russian).

18. Bibilo P. N. *Integrated circuit design systems based on the VHDL Language: StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum.* Moscow, SOLON-Press, 2005. 384 p. (In Russian).

19. Bibilo P. N., Romanov V. I. The system of logical optimization of digital circuits functional structural descriptions based 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). https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-4-9-16. – EDN: ZHOFRS.

20. Toropov N. R. Minimization of systems of Boolean functions in the DNF class. *Logicheskoye proyektirovaniye*, proceedings. Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the Academy of Sciences of Belarus, 1999, iss. 4, pp. 4–19. (In Russian).

21. Kardash S. N. Construction of block partitions of systems of Boolean functions based on the problem of covering Boolean matrixes. *BIG DATA i analiz vysokogo urovnya = BIG DATA and Advanced Analytics*, proceedings of 9th International res.-to-pract. conf. (Minsk, May 17–18, 2023), in 2 parts. Pt. 2. Minsk, BSUIR, 2023, pp. 326–330. (In Russian). EDN: OGQMZK.

22. Bibilo P. N., Lankevich Yu. Yu., Romanov V. I. Logical minimization of multilevel representations of Boolean function systems. *Informatsionnyye tekhnologii = Information Technologies*, 2023, vol. 29, no. 2, pp. 59–71. (In Russian). https://doi.org/10.17587/it.29.59-71. – EDN: RGJEJU.

The article was submitted 31.01.2024; approved after reviewing 20.02.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

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

Sergei N. Kardash – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (Belarus, 220012, Minsk, Surganov st., 6), kardash77@gmail.com

Vladimir I. Romanov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Leading Scientific Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (Belarus, 220012, Minsk, Surganov st., 6), rom@newman.bas-net.by

Уважаемые авторы!

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

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.89
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-679-686
EDN: AQTEEW

Управление параметрами исполнительного оборудования при автоматизации сборочных операций

Ю. С. Шевнина, Л. Г. Гагарина, Е. В. Конюхов

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

yusm@rambler.ru

Аннотация. Основная проблема сборочных операций – определение взаимного расположения / ориентирования элементов и их последующего совмещения. Следовательно, при автоматизации сборочных операций в микроэлектронике необходимо учитывать технологические и конструктивные особенности собираемых изделий, такие как маршрут сборки изделия, схема совмещения и соединения элементов, линейные размеры, тип изделия, физико-химические свойства изделия и его составные элементы, технические условия и требования к сборке изделия. Кроме того, крайне важно соблюдать основные принципы, позволяющие обеспечивать качество изделия, его долговечность и надежность при эксплуатации. В работе определены параметры исполнительного оборудования при автоматизации сборочных операций. Исследована конфигурация производственного оборудования, представляющая собой совокупность настроек, аппаратных ограничений, выбранных дополнительных устройств и типов интерфейсов. Представлены образ изделия, учитывающий все его особенности, математическая модель изделия, полученная на основе его образа, математическая модель конфигурации исполнительного оборудования, схема автоматизированной сборки изделия. Рассмотренные решения дают возможность сформировать методику, позволяющую адаптивно выбирать конфигурацию оборудования с учетом маршрута сборки изделия, совмещаемых элементов и их характеристик, полученных в результате анализа и синтеза информации из технологической и конструкторской документации.

Ключевые слова: автоматизированная сборка, образ изделия, модель конфигурации, адаптивное управление исполнительным оборудованием

Для цитирования: Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Конюхов Е. В. Управление параметрами исполнительного оборудования при автоматизации сборочных операций // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 679–686. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-679-686. – EDN: AQTEEW.

© Ю. С. Шевнина, Л. Г. Гагарина, Е. В. Конюхов, 2024

Original article

Controlling parameters of driven equipment when automating assembly operations

Yu. S. Shevnina, L. G. Gagarina, E. V. Konyukhov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

yusm@rambler.ru

Abstract. The main problem of assembly operations is determining the relative position / orientation of elements and their subsequent alignment. Consequently, when automating assembly operations in microelectronics it is necessary to consider the technological and design features of the assembled products, such as the product assembly route, scheme for elements combining and connecting, linear dimensions, product type, physical and chemical properties of the product and its constituent elements, technical specifications and requirements for product assembly. In addition, it is extremely important to observe the basic principles to ensure product quality, durability and reliability during operation. In this work, the approaches to driven equipment parameters controlling when automating assembly operations are considered. The production equipment configuration is investigated, which is a collection of settings, hardware limitations, selected additional devices and types of interfaces. An image of the product with account for all its features, a mathematical model of the product obtained on the basis of its image, a mathematical model of the driven equipment configuration, and a diagram of automated product assembly are presented. The considered solutions make it possible to develop a procedure that allows the adaptive selection of the equipment configuration considering the product assembly route, combined elements and their characteristics obtained as a result of the analysis and synthesis of information from manufacturing and design documents.

Keywords: automated assembly, product image, configuration model, adaptive control of driven equipment

For citation: Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Konyukhov E. V. Controlling parameters of driven equipment when automating assembly operations. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 679–686. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-679-686. – EDN: AQTEEW.

Введение. В настоящее время в микроэлектронном производстве автоматизировано более 90 % технологических операций, в то время как сборочных – только 7 %, что обусловлено их высокой трудоемкостью. Основная сложность сборочных операций – определение взаимного расположения / ориентирования элементов и их последующего совмещения. Как правило, для совмещения и позиционирования элементов на производстве используется оборудование типа манипулятор, который осуществляет захват элемента для его последующего перемещения. Современные тенденции к уменьшению линейных размеров изделий и, следовательно, к повышению точности выполняемых

операций требуют новых способов управления исполнительным оборудованием с учетом его аппаратных ограничений. Кроме того, необходимо учитывать тип, физико-химические и другие свойства совмещаемых элементов при автоматизации сборочных операций в микроэлектронике [1, 2].

В настоящей работе рассматриваются подходы к настройке параметров исполнительного оборудования и управлению ими при автоматизации сборочных операций.

Определение параметров исполнительного оборудования. При выполнении любых сборочных операций, в том числе и в микроэлектронике, следует соблюдать основные принципы, позволяющие обеспечивать качество изделий, его долговечность и надежность при эксплуатации: высокая точность и скорость сборки; применение исполнительного оборудования, позволяющего выполнять операцию с требуемыми параметрами [3, 4]. Следовательно, при автоматизации сборочных операций в микроэлектронике необходим комплексный подход, учитывающий технологические и конструктивные особенности собираемых изделий. Данную задачу можно решить последовательным сбором информации из технической и конструкторской документации на выпускаемые изделия, однако она значительно усложняется для изделий, состоящих из множества совмещаемых элементов. Как правило, при использовании автоматизированных систем управления данные из документации собираются в базе данных, что позволяет упростить их использование при проектировании сборочных операций.

При автоматизации сборочных операций должны учитываться маршрут сборки изделия, схема совмещения и соединения элементов, линейные размеры и масса собираемого изделия и его отдельных элементов, технические условия и требования к сборке изделия. Процесс изготовления одного изделия может состоять из нескольких сборочных операций, как последовательных, так и отдельных. Причем каждая операция требует различных настроек исполнительного оборудования. Исходными данными для построения автоматизированного маршрута сборки являются сведения технологической и конструкторской документации. Предлагается использовать образ изделия, содержащий перечень элементов, последовательность их сборки и требования к ней (рис. 1). При формировании образа изделия учитываются его тип, требования к сборке, методы совмещения и позиционирования элементов, требования к соединению элементов.

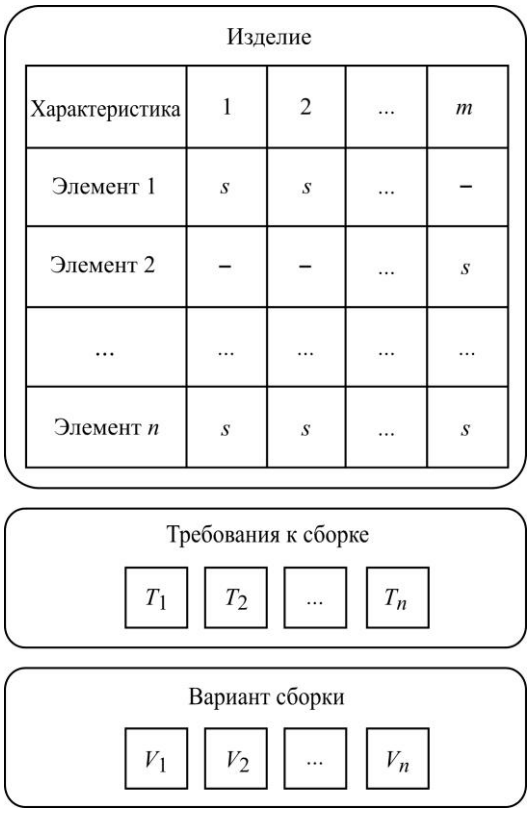


Рис. 1. Образ изделия
Fig. 1. Product image

Маршрут M автоматизированной сборки изделий зависит от нескольких взаимосвязанных факторов: множества элементов изделия $S=\{s_1,...,s_n\}$, множества параметров исполнительного оборудования $P=\{p_1,...,p_n\}$, множества вариантов сборки $V=\{v_1,...,v_n\}$. При выборе подмноже-

ства $V_i \subset V$ определяется подмножество $P_i \subset P$. С целью повышения эффективности автоматизированной сборки изделий для выбора варианта сборки и параметров исполнительного оборудования в зависимости от типа изделия и входящих в его состав элементов используются методы машинного обучения. На основе накопленных ранее данных строится прогностическая модель сборки, позволяющая определить параметры исполнительного оборудования: максимальный угол поворота манипулятора, минимальный шаг сдвига элемента и т. п. Схема автоматизированной сборочной операции представлена на рис. 2.

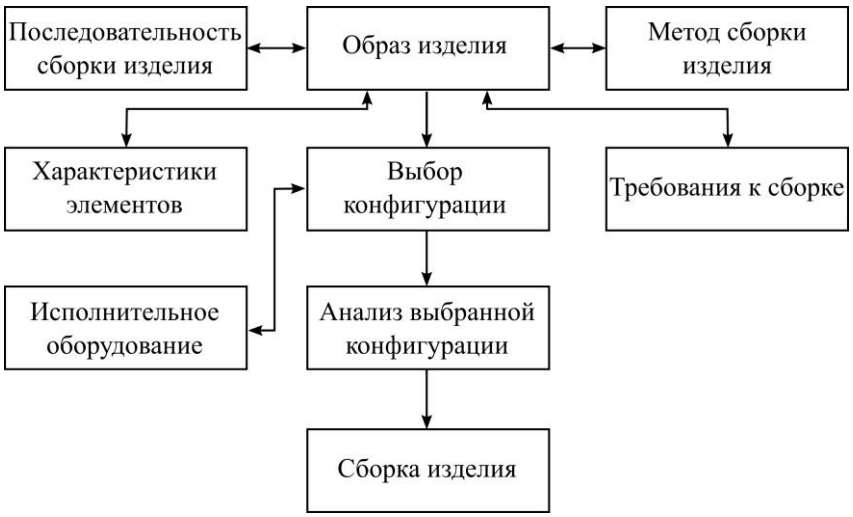


Рис. 2. Схема маршрута сборки
Fig. 2. Assembly route diagram

Для анализа и обработки данных методами машинного обучения применяется кластеризация по определенным признакам [5, 6]. Рассмотрим формализованное математическое представление кластеризации исходных данных, в качестве которых используются параметры исполнительного оборудования: тип и количество интерфейсов, дополнительно подключаемые устройства, аппаратные ограничения. Набор таких данных определяет состояние исполнительного оборудования. Пусть D – исходное пространство выделенных признаков (количественных, качественных, смешанных); $h: D \to R$ – определяющий признак; $(D_1,...,D_n) \subset D$ – последовательность данных. При этом $\forall i \in \{1,...,n\} \exists j \in \{1,...,n\} : D_i \neq D_j$; $\forall i \in \{1,...,n\} : \max\{h(D_i, D_k) \mid k \in \{1,...,n\}\} > 0$. Следовательно, для каждого i-го элемента последовательности данных определяется функция сходства:

$$\theta_i : \{1,...,n\} \to [0,1]; \quad \theta_i(j) := 1 - \frac{h(D_i, D_j)}{\max\{h(D_i, D_k) \mid k \in \{1,...,n\}\}},$$

$$\delta_i : \{1,...,n\}^2 \to [0,...,1]; \quad \delta_i(k,l) := 1 - |\theta_i(D_k) - \theta_i(D_i)|,$$

$$\mu : \{1,...,n\}^2 \to [0,...,1]; \quad \mu(i,j) := \min\{\delta_k(i,j) \mid k \in \{1,...,n\}\}.$$

Рекурсивная функция $\mu^{(k)}:\{1,...,n\}^2 \to [0,1]$ для $k=1,2,...,n$ равна:

$$\begin{cases} \mu^{(1)}(i,j) := \mu(i,j), \\ \mu^{(k)}(i,j) := \max\left\{\min\left\{\mu^{(k-1)}(i,s), \mu^{(k-1)}(s,j)\right\} \mid s \in \{1,...,n\}\right\}. \end{cases}$$

Отношение эквивалентности $R_\gamma \subset \{D_1,...,D_n\}^2$ для элементов $\gamma \in [0,1](D_i,D_j) \in R_\gamma :\Leftrightarrow \mu^{(k)}(i,j) \geq \gamma$ позволяет разбить множество данных $\{D_1,...,D_n\}$ на классы эквивалентности [7, 8].

Для создания базы знаний и обучения нейронной сети необходимо собрать и обработать исходные данные в разных состояниях исполнительного оборудования. В результате кластеризации исходных данных по выделенным признакам формируется матрица нечеткого разбиения $F = \left[f_{ij} \right], f_{ij} \in [0,1]; \quad i=1,...,m; \quad j=1,...,k$. Для обеспечения наполняемости кластера необходимо выполнение условия $\sum_{i=1}^{m} f_{ij} > 0, j \in \{1,..,k\};$ для создания базы знаний о состояниях исполнительного оборудования – условия $\sum_{j=1}^{k} f_{ij} = 1, i \in \{1,...,m\}$.

После выполнения кластеризации данных формируются условия возникновения, сохранения и переходов между состояниями исполнительного оборудования. С учетом этих условий строится модель состояний исполнительного оборудования, которая имеет иерархическую структуру (рис. 3):

$$\begin{cases} S_1 : \{D_1,...,D_k\} \Rightarrow M_1, \\ K \\ S_i : \{D_1,...,D_m\} \Rightarrow M_i, \\ K \\ S_n : \{D_1,...,D_n\} \Rightarrow M_n, \end{cases}$$

где S_i – состояние исполнительного оборудования; M_i – иерархический уровень состояния, который определяет степень детализации или абстракции состояния технической системы; K – конфигурация параметров; k, n, m – количество данных, описывающих состояние исполнительного оборудования.

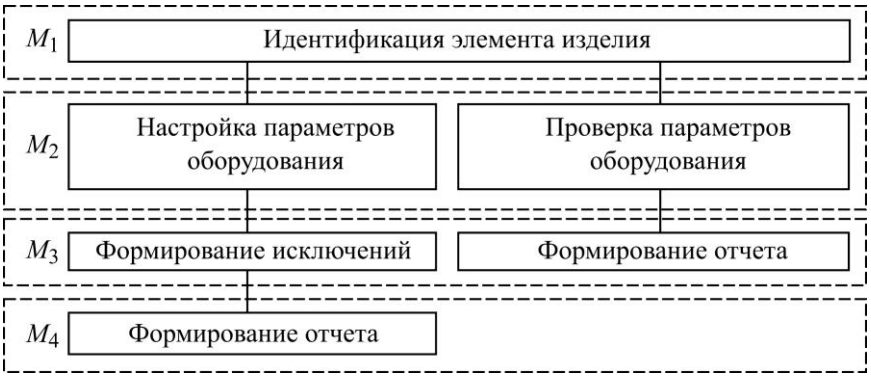


Рис. 3. Иерархическое представление состояний технической системы
Fig. 3. Hierarchical representation of technical system states

Рассмотренная модель состояний исполнительного оборудования позволяет разрабатывать алгоритмы адаптивного управления параметрами исполнительного оборудования при автоматизации сборочных операций. Адаптивность управления заключается в применении различных методов и средств настройки параметров исполнительного оборудования в зависимости от его текущего и требуемого состояний, что определяется иерархическим уровнем. При этом для формирования управляющего воздействия требуется настройка только тех параметров, которые отвечают за состояние исполнительного оборудования с учетом иерархического уровня.

Управление конфигурациями параметров исполнительного оборудования. Конфигурация параметров исполнительного оборудования при автоматизации сборочных операций представляет собой совокупность настроек, аппаратных ограничений, выбранных дополнительных устройств и типов интерфейсов [9–11]. При сборке изделия поиск и выбор конфигурации проводится с учетом количества и характеристик элементов изделия. Все возможные конфигурации K_i для сборки изделия объединены во множество $K = \{K_1, ..., K_n\}$.

На основании изложенного математическая модель собираемого изделия E имеет вид

$$E = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & K & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & K & s_{2n} \\ K & K & K & K \\ s_{m1} & s_{m2} & K & s_{mn} \end{pmatrix},$$

где $s_{ij} = \{(a, v)\} \in S$ – элемент изделия, математическое представление которого заключается во множестве его характеристик a и значений v.

Таким образом, процесс сборки изделия представляет собой $L = V \cap K \cap E$ и может быть рассмотрен с учетом иерархии состояний исполнительного оборудования. Процесс сборки осуществляется постепенно. В зависимости от количества и типа элементов собираемого изделия и способа сборки выбирается конфигурация исполнительного оборудования (рис. 4).

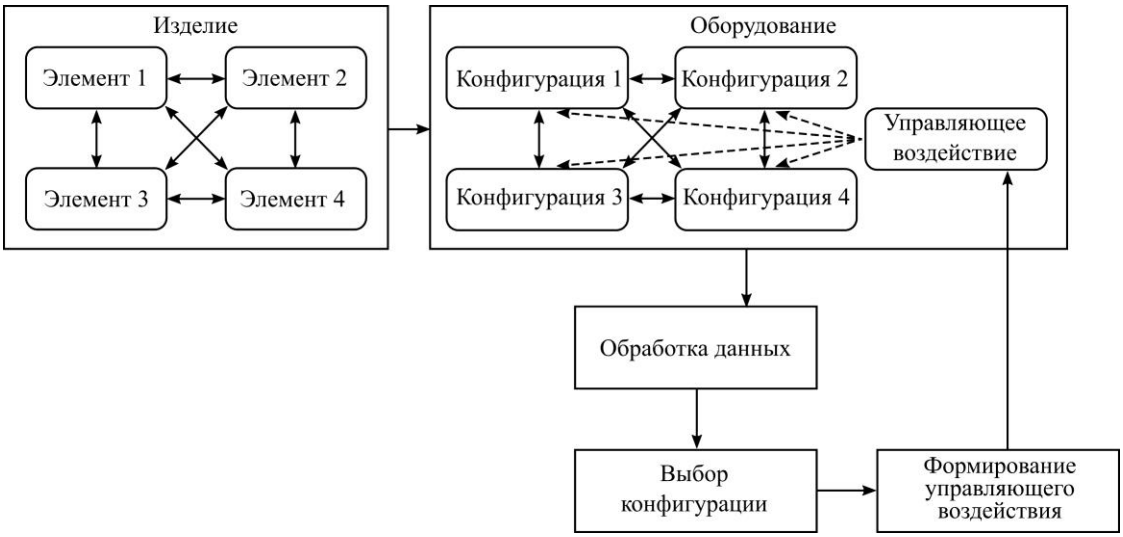


Рис. 4. Схема автоматизированной сборки изделия
Fig. 4. Scheme of automated product assembly

Заключение. Рассмотренные решения позволяют сформировать методику управления параметрами производственного оборудования при автоматизации сборочных операций: анализ и синтез технологической и конструкторской документации с целью формирования образа выпускаемого изделия; определение метода сборки; выбор конфигурации исполнительного оборудования. При этом соблюдаются основные принципы, позволяющие обеспечивать качество изделий, его долговечность и надежность при эксплуатации.

Литература

1. ***Круглов М. Г., Юрин Д. С.*** Контроль качества в современных условиях // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 7. С. 193–199. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-193-194. – EDN: JMFOYC.

2. ***Скрипко Л. Е.*** Становление взглядов на менеджмент качества // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2022. Т. 21. № 3. С. 395–428. https://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2022.304. – EDN: AOKOVM.

3. ***Данилевич С. Б., Третьяк В. В.*** Выходной контроль: влияние индекса качества продукции на риски принятия ошибочных решений // Компетентность. 2022. № 4. С. 32–35. https://doi.org/10.24412/1993-8780-2022-4-32-35. – EDN: HPAZVE.

4. ***Смирнов К. К.*** Автоматизация операций прослеживаемости качества интегральных структур при производстве сверхбольших интегральных схем // Тр. МАИ. 2017. № 95. Ст. 25. EDN: ZHNYDR.

5. ***Емельянова М. Г., Смаилова С. С., Бакланова О. Е.*** Обнаружение поверхностных дефектов сварных соединений при визуальном контроле методами машинного зрения // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 1. С. 112–117. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1137. – EDN: UFHBJU.

6. ***Прыткова Е. А., Давыдов В. М.*** Анализ применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2023. Т. 21. № 1. С. 74–81. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81. – EDN: GJGYLJ.

7. ***Шевнина Ю. С.*** Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 3. С. 407–415. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415. – EDN: BZRDEB.

8. ***Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Конюхов Е. В., Харитонова А. Д.*** Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 537–546. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-537-546. – EDN: AVWMTN.

9. ***Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.*** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 383 с.

10. Interactive multidimensional modeling of linked data for exploratory OLAP / ***E. Gallinucci, M. Golfarelli, S. Rizzi et al.*** // Information Systems. 2018. Vol. 77. P. 86–104. https://doi.org/10.1016/j.is.2018.06.004

11. ***Cheraghalipour A., Hajiaghaei-Keshteli M., Paydar M. M.*** Tree growth algorithm (TGA): A novel approach for solving optimization problems // Eng. Appl. Artif. Intell. 2018. Vol. 72. P. 393–414. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.04.021

Статья поступила в редакцию 05.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 14.12.2023 г.; принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

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

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gagar@bk.ru

Конюхов Евгений Владимирович **–** соискатель Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yusm@rambler.ru

References

1. Kruglov M. G., Yurin D. S. Quality control in modern conditions. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki = Proceedings of the TSU. Technical Sciences*, 2023, no. 7, pp. 193–199. (In Russian). https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-193-194. – EDN: JMFOYC.

2. Skripko L. E. Adoption of views on quality management. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment = Vestnik of Saint Petersburg University. Management*, 2022, vol. 21, no. 3, pp. 395–428. (In Russian). https://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2022.304. – EDN: AOKOVM.

3. Danilevich S. B., Tret'yak V. V. Final control: Influence of the product quality index on the risks of making erroneous decisions. *Kompetentnost' = Competency (Russia),* 2022, no. 4, pp. 32–35. (In Russian). https://doi.org/10.24412/1993-8780-2022-4-32-35. – EDN: HPAZVE.

4. Smirnov K. Automation of operations of traceability of integrated structures quality in the manufacture of VLSIs. *Trudy MAI*, 2017, no. 95, art. no. 25. (In Russian). EDN: ZHNYDR.

5. Yemelyanova M. G., Smailova S. S., Baklanova O. E. Detection of surface defects in welded joints during visual inspections using machine vision methods. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics,* 2023, vol. 47, no. 1, pp. 112–117. (In Russian). https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1137. – EDN: UFHBJU.

6. Prytkova E. A., Davydov V. M. Analysis of the use of hierarchical neural network methods in quality control. *Vestnik MGTU im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2023, vol. 21, no. 1, pp. 74–81. (In Russian). https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81. – EDN: GJGYLJ.

7. Shevnina Ju. S. Method for estimating the state of a nonlinear system based on logical data analysis. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 407–415. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415. – EDN: BZRDEB.

8. Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Konyukhov E. V., Kharitonova A. D. Method of cluster analysis of heterogeneous data using the provisions of fuzzy logic. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 537–546. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-537-546. – EDN: AVWMTN.

9. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems.* Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2008. 383 p. (In Russian).

10. Gallinucci E., Golfarelli M., Rizzi S., Abelló A., Romero O. Interactive multidimensional modeling of linked data for exploratory OLAP. *Information Systems*, 2018, vol. 77, pp. 86–104. https://doi.org/10.1016/j.is.2018.06.004

11. Cheraghalipour A., Hajiaghaei-Keshteli M., Paydar M. M. Tree growth algorithm (TGA): A novel approach for solving optimization problems. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 2018, vol. 72, pp. 393–414. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.04.021

The article was submitted 05.12.2023; approved after reviewing 14.12.2023;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

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

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

Evgeny V. Konyukhov **–** Applicant of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yusm@rambler.ru

Научная статья
УДК 658.512.2.011.56.012:621.382.049.77:006.9
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-5-687-693
EDN: ASGNWO

Особенности разработки программной документации по стандартам ЕСПД для САПР микроэлектроники

М. А. Гундарцев, М. Ю. Семенов, В. С. Калашников, В. В. Королев, А. А. Константинова

ООО «НМ-Тех», г. Москва, Россия

info@nm-tech.org

Аннотация. Разработка программных САПР ведется в строгом соответствии с требованиями Единой системы программной документации (ЕСПД). На каждый разрабатываемый программный продукт необходимо выпускать комплект сопроводительной программной документации, выполненной в соответствии с ЕСПД. Актуальные стандарты ЕСПД не учитывают специфики разработки сложного современного программного обеспечения. В работе рассмотрены особенности разработки программной документации при создании программного обеспечения для проектирования изделий микроэлектроники в соответствии со стандартами ЕСПД. Представлены виды программных и эксплуатационных документов и их содержание. Приведен пример подготовки пояснительной записки эскизного проекта по стандартам ЕСПД. Рассмотрен подход модульного разбиения программного продукта САПР при разработке программной документации, позволяющий описать функционал программы, применяемые алгоритмы, математические модели, форматы входных и выходных данных и др. Отмечена необходимость корректировки существующей нормативной программной документации ЕСПД с учетом современных реалий, а также разработки структурированной методики по оформлению каждого программного документа.

Ключевые слова: ЕСПД, программная документация, программное обеспечение, микроэлектроника, САПР

Для цитирования: Особенности разработки программной документации по стандартам ЕСПД для САПР микроэлектроники / М. А. Гундарцев, М. Ю. Семенов, В. С. Калашников и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 5. С. 687–693. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-687-693. – EDN: ASGNWO.

© М. А. Гундарцев, М. Ю. Семенов, В. С. Калашников, В. В. Королев, А. А. Константинова, 2024

Original article

Features of the development of software documentation compliant with USPD standards for microelectronics CAD

M. A. Gundartsev, M. Yu. Semenov, V. S. Kalashnikov, V. V. Korolev, A. A. Konstantinova

"NM-Tech" LLC, Moscow, Russia

info@nm-tech.org

Abstract. Development of CAD software is done in strict compliance with requirements of Unified System for Program Documentation (USPD). For each software product being developed, it is necessary to issue a set of accompanying software documentation compliant with USPD. However, current USPD standards take no regard to specifics of the development of complex modern software. In this work, the features of drawing up software documentation upon development of software for microelectronics products design in compliance with USPD standards are considered. The program and accompanying operational document types and their contents are presented. An example of preparation of an explanatory note of a draft design according to USPD standards is given. An approach of "modular" decomposition of CAD software upon software documentation drawing up allowing the description of software feature set, applied algorithms, mathematical models, input and output data formats etc. is considered. It has been demonstrated that it is necessary to revise the existing USPD requirements documentation for software with account for present-day developments and to elaborate structured procedure for each software document drawing up.

Keywords: USPD, software documentation, software, microelectronics, CAD

For citation: Gundartsev M. A., Semenov M. Yu., Kalashnikov V. S., Korolev V. V., Konstantinova A. A. Features of the development of software documentation compliant with USPD standards for microelectronics CAD. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 5, pp. 687–693. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-5-687-693. – EDN: ASGNWO.

Введение. В микроэлектронной промышленности при выполнении опытно-конструкторских работ разработчики используют три основные системы оформления документации: Единую систему конструкторской документации (ЕСКД), Единую систему технологической документации (ЕСТД), Единую систему программной документации (ЕСПД). В зависимости от видов выполняемых работ разработчики выпускают сопроводительную документацию как по одной выбранной системе, так и по комплексу документов, включающему в себя документацию разных классов. До настоящего времени до 90 % конструкторских работ в секторе микроэлектроники проводились по стандартам ЕСКД или ЕСТД. Количественное соотношение работ по ЕСПД незначительно, что объясняется использованием большинством разработчиков для проектирования зарубежных САПР. Многие университеты РФ, выпускающие профильных специ-

алистов по проектированию микроэлектронных изделий, имеют специализированные образовательные программы по работе с программными продуктами Cadence и Synopsys [1]. Тема развития отечественных САПР освещалась в работах [2, 3] на примере САПР для машиностроения, однако в них не рассматривался сектор микроэлектронной промышленности.

В настоящей работе анализируются особенности разработки программной документации по стандартам ЕСПД при создании программного обеспечения для проектирования изделий микроэлектроники.

Постановка задачи. Для разработки современных программных инструментов САПР, не уступающих по характеристикам ведущим мировым продуктам и ориентированных на отечественный технологический базис, инициирован ряд опытно-конструкторских работ. Разработка программных инструментов САПР должна проводиться на основании ГОСТ 19.001-77 ЕСПД [4]. Соответственно, для каждого программного продукта САПР необходимо разработать сопроводительную документацию, включающую в себя перечень программных и эксплуатационных документов (табл. 1 и 2).

Перечень документов, приведенный в табл. 1 и 2, не является обязательным к разработке в полном объеме. Необходимая программная и эксплуатационная документация на каждый конкретный разрабатываемый программный продукт САПР определяется в соответствии с ГОСТ 19.101-77 ЕСПД и обязательно отражается в техническом задании.

Таблица 1

Виды программных документов и их содержание [4]

Table 1

Types of program documents and their contents [4]

Документ	Содержание документа
Спецификация	Состав программы и документации на нее
Ведомость держателей подлинников	Перечень предприятий, на которых хранятся подлинники программных документов
Текст программы	Запись программы с необходимыми комментариями
Описание программы	Сведения о логической структуре и функционировании программы
Программа и методика испытаний	Требования, подлежащие проверке при испытании программы, а также порядок и методы их контроля
Техническое задание	Назначение и область применения программы, технические, технико-экономические и специальные требования, предъявляемые к программе, необходимые стадии и сроки разработки, виды испытаний
Пояснительная записка	Схема алгоритма, общее описание алгоритма и(или) функционирования программы, обоснование принятых технических и технико-экономических решений
Эксплуатационные документы	Сведения для обеспечения

Таблица 2

Виды эксплуатационных документов и их содержание [4]

Table 2

Types of operational documents and their contents [4]

Документ	Содержание документа
Ведомость эксплуатационных документов	Перечень эксплуатационных документов на программу
Формуляр	Основные характеристики программы, комплектность и сведения об эксплуатации программы
Описание применения	Сведения о назначении программы, области применения, применяемых методах, классе решаемых задач, ограничениях по применению, минимальной конфигурации технических средств
Руководство системного программиста	Сведения для проверки, обеспечения функционирования и настройки программы на условиях конкретного применения
Руководство программиста	Сведения для эксплуатации программы
Руководство оператора	Сведения для обеспечения процедуры общения оператора с вычислительной системой в процессе выполнения программы
Описание языка	Описание синтаксиса и семантики языка
Руководство по техническому обслуживанию	Сведения для применения тестовых и диагностических программ при обслуживании технических средств

Пример разработки пояснительной записки. Пояснительная записка для эскизного и технического проектов по стандартам ЕСПД выполняется по ГОСТ 19.104-78 ЕСПД [5], ГОСТ 19.105-78 ЕСПД [6], ГОСТ 19.106-78 ЕСПД [7] и ГОСТ 19.404-79 ЕСПД [8], которые являются общими и содержат правила оформления, применимые ко всем видам разрабатываемых текстовых документов по ЕСПД. ГОСТ 19.404-79 специальный и включает в себя требования по разработке пояснительной записки. Рассмотрим некоторые особенности данного документа.

Структура работ по эскизному и техническому проектам определятся ГОСТ 19.102-77 ЕСПД [9]. Перечень работ по эскизному проекту: 1) разработка эскизного проекта: предварительная разработка структуры входных и выходных данных, уточнение методов решения задачи, разработка общего описания алгоритма решения задачи, разработка технико-экономического обоснования; 2) утверждение эскизного проекта: разработка пояснительной записки, согласование и утверждение эскизного проекта.

Перечень работ по техническому проекту: 1) разработка технического проекта: уточнение структуры входных и выходных данных, разработка алгоритма решения задачи, определение формы представления входных и выходных данных, определение семантики и синтаксиса языка, разработка структуры программы, окончательное определение конфигурации технический средств; 2) утверждение технического проекта: формирование плана мероприятий по разработке и внедрению программ, разработка пояснительной записки, согласование и утверждение технического проекта.

Согласно ГОСТ 19.404-79 ЕСПД пояснительная записка должна включать в себя следующие разделы: введение; назначение и область применения; технические харак-

теристики; ожидаемые технико-экономические показатели; источники, использованные при разработке. Таким образом, работы по эскизному проекту могут входить только в раздел «Технические характеристики». Содержание разделов пояснительной записки также указано в ГОСТ 19.404-79.

В разделе «Технические характеристики» отмечено, какие подразделы должны быть освещены. Здесь возникает проблема при составлении документа. При выполнении любой опытно-конструкторской работы головным документом является техническое задание, в котором прописаны все обязательные к выполнению задачи, в том числе техническое воплощение проекта, нормативная документация, сроки сдачи и др. Современные программные продукты САПР для микроэлектроники имеют сложную многоуровневую иерархическую структуру. В силу данных обстоятельств, существенного временно́го промежутка между выпуском ЕСПД (70–80-е гг. XX в.) и современными разработками представляется крайне затруднительным описать программный продукт САПР согласно ГОСТ 19.404-79 ЕСПД. Однако данный ГОСТ является уставным нормативным документом по разработке, и игнорировать его требования не представляется возможным.

Модульный подход к описанию программной документации по стандартам ЕСПД при создании САПР. В ГОСТ 19.404-79 ЕСПД приведено уточнение: «В зависимости от особенностей документа отдельные разделы (подразделы) допускается объединять, а также вводить новые разделы (подразделы)». С учетом данной рекомендации, а также ввиду сложной иерархической структуры современных программных инструментов может применяться подход модульного разбиения к описанию программного продукта САПР [10]. Однако применение модульного подхода при непосредственном программировании не имеет корреляции с обязательной программной документацией, выпускаемой при разработке САПР. Программный продукт САПР может быть разделен на основные компоненты или подсистемы, представляющие собой определенную часть базисного функционала программного продукта. В свою очередь, каждый основной компонент или подсистема может иметь последующее разбиение. Разбиение следует проводить до появления возможности описать единичный основной компонент или подсистему в соответствии с требованиями технического задания и нормативной документации.

В качестве научно-технического решения предлагается использовать полученные в результате разбиения САПР основные компоненты, модули или подсистемы как условные программные единицы при оформлении программной документации для описания требуемого функционала согласно требованиям ЕСПД. В соответствии с требованиями ГОСТ 19.404-79 ЕСПД необходимо описать алгоритм и схему работы программы. В случае применения модульного подхода описание работы программы будет основано на описании работы каждой отдельной подсистемы или модуля, что позволит получить четкие и структурированные программные документы, отвечающие всем требованиям ЕСПД. Таким образом, использование подхода модульного разбиения программного продукта САПР при разработке программной документации позволяет в полной мере описать функционал программы, применяемые алгоритмы, математические модели, форматы входных и выходных данных и др. При этом разрабатываемая программная документация полностью отражает требования, указанные в техническом задании на разработку, и удовлетворяет требованиям ГОСТ 19.404-79 ЕСПД.

Следует отметить, что применение модульного подхода к разработке программной документации носит вынужденный характер. Это обусловлено использованием при

разработке ЕСПД монолитного подхода к описанию программ, что в современных условиях неактуально.

Заключение. Для составления программной документации в рамках выполнения государственных программных разработок САПР целесообразно системно переработать существующую нормативную программную документацию ЕСПД. В новой версии стандартов необходимо учесть существующие разработки программных продуктов, в том числе САПР микроэлектроники, а также разработать структурированную методику по оформлению каждого программного документа.

Актуальным является выделение направления по разработке специализированных стандартов, которые будут носить отраслевую направленность и позволят принять во внимание особенности разработки. Подобная практика нашла применение при разработке конструкторской документации (ЕСКД) для изделий микроэлектронной промышленности.

Литература

1. Synopsys [Электронный ресурс]. URL: https://www.synopsys.com (дата обращения: 26.07.2024).

2. ***Круглов Б. В.*** Программная реализация имитационной модели последовательной разработки документации в САПР АСУ // Автоматизация процессов управления. 2010. № 3. С. 76–80. EDN: MUONKP.

3. ***Булавин В. Ф., Степанов А. С., Яхричев В. В.*** Информационное поле цифровых технологий малых машиностроительных предприятий // Вестник ВоГУ. Серия: Технические науки. 2019. № 2 (4). С. 31–37. EDN: HQUFWA.

4. ГОСТ 19.101–77. Единая система программной документации. Виды программ и программных документов: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2010. 4 с.

5. ГОСТ 19.104–78. Единая система программной документации. Основные надписи: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2010. 6 с.

6. ГОСТ 19.105–78. Единая система программной документации. Общие требования к программным документам: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2010. 11 с.

7. ГОСТ 19.106–78. Единая система программной документации. Требования к программным документам, выполненным печатным способом: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2010. 3 с.

8. ГОСТ 19.404–79. Единая система программной документации. Пояснительная записка. Требования к содержанию и оформлению: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2010. 3 с.

9. ГОСТ 19.102–77. Единая система программной документации. Стадии разработки // Единая система программной документации: сб. М.: Стандартинформ, 2010. С. 26–28.

10. ***Leroy X.*** A modular module system // J. Funct. Program. 2000. Vol. 10. Iss. 3. P. 269–303. https://doi.org/10.1017/S0956796800003683

Статья поступила в редакцию 05.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 19.03.2024 г.;
принята к публикации 16.08.2024 г.

Информация об авторах

Гундарцев Михаил Александрович – кандидат технических наук, руководитель направления по сопровождению проектов ООО «НМ-Тех» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), info@nm-tech.org

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

Калашников Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, начальник отдела развития САПР и перспективных разработок ООО «НМ-Тех» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), vkalashnikov@nm-tech.org

Королев Василий Владимирович – руководитель направления автоматизации проектирования ООО «НМ-Тех» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), vkorolev@nm-tech.org

Константинова Александра Алексеевна – специалист по сопровождению проектов ООО «НМ-Тех» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), akonstantinova@nm-tech.org

References

1. *Synopsys.* Available at: https://www.synopsys.com (accessed: 26.07.2024).

2. Kruglov B. V. Software implementation of the simulation model of sequential document development in CAD ACS. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of Control Processes*, 2010, no. 3, pp. 76–80. (In Russian). EDN: MUONKP.

3. Bulavin V. F., Stepanov A. S., Yakhrichev V. V. Information field of small machine-building enterprises digital technology. *Vestnik VoGU. Seriya: Tekhnicheskiye nauki = Bulletin of Vologda State University. Series: Technical Sciences*, 2019, no. 2 (4), pp. 31–37. (In Russian). EDN: HQUFWA.

4. *GOST 19.101–77. Unified system for program documentation. Types of programs and program documents,* interstate standard. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 4 p. (In Russian).

5. *GOST 19.104–78. Unified system for program documentation. Basic legends,* interstate standard. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 6 p. (In Russian).

6. *GOST 19.105–78. Unified system for program documentation. General requirement for program documents,* interstate standard. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 11 p. (In Russian).

7. *GOST 19.106–78. Unified system for program documentation. Requirements for printed documents,* interstate standard. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 3 p. (In Russian).

8. *GOST 19.404–79. Unified system for program documentation. Explanatory note. Requirements for contents and form of presentation,* interstate standard. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 3 p. (In Russian).

9. GOST 19.102–77. Unified system for program documentation. Development stages, interstate standard. *Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii*, collection. Moscow, Standartinform Publ., 2010, pp. 26–28. (In Russian).

10. Leroy X. A modular module system. *J. Funct. Program.*, 2000, vol. 10, iss. 3, pp. 269–303. https://doi.org/10.1017/S0956796800003683

The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 19.03.2024;
accepted for publication 16.08.2024.

Information about the authors

Mikhail A. Gundartsev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Project Support Department, “NM-Tech” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya prwy, 6), info@nm-tech.org

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

Vyacheslav S. Kalashnikov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the CAD Development and Advanced Development Department, “NM-Tech” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya prwy, 6), vkalashnikov@nm-tech.org

Vasily V. Korolev – Head of the Design Automation Department, “NM-Tech” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya prwy, 6), vkorolev@nm-tech.org

Alexandra A. Konstantinova – Project Support Specialist, “NM-Tech” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya prwy, 6), akonstantinova@nm-tech.org

КОНФЕРЕНЦИИ

Об итогах International Conference “Functional Chalcogenides: Physics, Technology and Applications”

С 23 по 27 июня 2024 г. в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» проходила первая международная конференция, посвященная халькогенидным функциональным материалам, – International Conference “Functional Chalcogenides: Physics, Technology and Applications”.

Конференция проводилась в рамках программы развития МИЭТ при поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» МИЭТ.

В программу конференции включены более 100 докладов представителей различных научно-исследовательских организаций и высокотехнологичных предприятий из России (НПК «Технологический центр», ОЭЗ «Технополис Москва», АО «ЛЛС», АО «НПП «ЭСТО», ООО «АДВ-Инжиниринг» и др.), Китая, Казахстана, Беларуси, Венгрии, Швейцарии и Индии.

Участники конференции работали по пяти научным направлениям: *халькогенидные стекла; фазопеременные материалы; топологические изоляторы; двумерные халькогениды; оптические, электрические и термоэлектрические устройства*.

Конференцию открыл проректор по научной работе МИЭТ, д. т. н., проф. С. А. Гаврилов, который отметил актуальность представляемых на конференции направлений и значимость халькогенидных материалов для дальнейшего развития материаловедения, термоэлектричества, микроэлектроники, интегральной фотоники и ряда других наукоемких областей.

В рамках конференции по результатам выступлений проведен конкурс на лучшую научную работу молодых участников мероприятия (студентов и аспирантов). Несколько работ в номинациях «Лучший устный доклад» и «Лучший стендовый доклад» отмечены дипломами лауреатов и ценными призами, а также рекомендованы к публикации в журнале «Известия высших учебных заведений. Электроника».

Проведение второй международной конференции “Functional Chalcogenides: Physics, Technology and Applications” запланировано на 2026 г.

Оргкомитет конференции

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал **«Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА»** публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- **фундаментальные исследования;**
- **материалы электроники;**
- **технологические процессы и маршруты;**
- **элементы интегральной электроники;**
- **схемотехника и проектирование;**
- **микро- и наносистемная техника;**
- **интегральные радиоэлектронные устройства;**
- **биомедицинская электроника;**
- **информационно-коммуникационные технологии;**
- **проблемы высшего образования.**

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в двух экземплярах***.
2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.
3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).
4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: http://ivuz-e.ru/authors/

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна быть структурирована и содержать: введение; основную часть; заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

– на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;

– на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать ***ключевые слова*** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

– печатается ***через два интервала*** с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

– абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только ***по умолчанию.*** Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, PDF, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

– оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

– нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

– русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык (для References).

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

– оформляется отдельным файлом;

– необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

– указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru