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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 29 | Vol. 29
№ 4 | No. 4
июль – август | July – August
2024

Юбилейный Российский форум «Микроэлектроника 2024»

С 23 по 28 сентября 2024 г. на федеральной территории «Сириус» (г. Сочи) пройдет ключевое информационное событие года в сфере электронных технологий – *юбилейный Российский форум «Микроэлектроника 2024»*.

Председатель Программного комитета – Г. Я. Красников, академик РАН, президент РАН, научный руководитель АО «НИИМЭ», руководитель приоритетного технологического направления «Электронные технологии» РФ.

***Организаторы*:** АО «НИИМЭ» и АО «НИИМА «Прогресс» при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, Министерства науки и образования РФ, группа компаний «Элемент».

***Генеральный партнер*:** Фонд перспективных исследований.

***Инновационный партнер*:** АО «ОКБ «Астрон».

***Спортивный партнер*:** АО «Микрон».

***Партнеры*:** ООО «НПП «Итэлма», ООО «Остек-ЭК», АО «НИИ ТМ», Консорциум «Доверенные и экстремальные электронные системы» (НИЯУ МИФИ – АО «ЭНПО СПЭЛС»).

***Генеральный информационный партнер*:** АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА».

***Оператор*:** агентство деловых коммуникаций «ПрофКонференции».

***Программа Форума*:**

- Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули» (пройдет 26–27 сентября 2024 г. в Университете «Сириус»), включающая в себя двухдневные пленарные заседания, 13 научно-технических тематических секций, трек обзорно-дискуссионных заседаний на тему «Доверенные ПАК и ЭКБ для критической гражданской инфраструктуры»;
- деловая программа – открытые и закрытые заседания, бизнес-завтраки, презентации, стендовые доклады, зоны делового общения, пресс-конференции и брифинги, 20+ круглых столов по актуальным вопросам развития экономики данных в России, формирования нормативно-правовой базы, разработки ЭКБ, развития производственных мощностей и выпуска готовой продукции с участием ответственных сотрудников федеральных органов исполнительной власти, институтов развития, представителей промышленности, бизнеса, банков, науки и вузов;
- две предконференции (пройдут 9–12 сентября 2024 г. в г. Москве на базе НИЯУ МИФИ и 19–20 сентября 2024 г. в г. Зеленограде на базе НИУ МИЭТ), на которых будут представлены доклады на темы, связанные с созданием доверенных и экстремальных электронных систем, информационно-управляющих радиотехнических систем, ЭКБ, специального технологического оборудования, материалов, а также с другими актуальными направлениями развития научно-технического потенциала отрасли;
- выставка (пройдет 24–28 сентября 2024 г. в Парке науки и искусства «Сириус»), на которой представят научно-технические новинки более 150 организаций;
- 6-я Школа молодых ученых (пройдет 16–25 сентября 2024 г. в Парке науки и искусства «Сириус») – уникальная коммуникационная среда для 500 начинающих и состоявшихся специалистов микроэлектроники. Программа Школы включает в себя 10 тематических секций по различным отраслевым научным направлениям;
- программа «Микроэлектроника детям», состоящая из образовательных и культурно-развлекательных мероприятий для детей (различных возрастов) участников Форума.

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



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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 29, № 4, 2024
июль – август

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

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
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 12.08.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 17,205 усл.печ.л., 15,316 уч.-изд.л. Тираж 140 экз. Заказ № 14. 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

Григорьева Т. В., Голубков С. А., Бойко А. Н. Исследование *p–i–n*-диодных структур на высокоомных кремниевых подложках методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней..... 411

Материалы электроники

Хамдохов З. М., Маргушев З. Ч., Калажоков З. Х., Калажоков Х. Х., Кушхов Х. Б., Тешев Р. Ш. Особенности воздействия пучка ионов гелия на пленку интеркалированного графита 420

Технологические процессы и маршруты

Ширяев Б. В., Аргунов Д. П., Жидик Ю. С., Ющенко А. Ю., Лаптев И. В. Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния 432

Некрасов Н. П., Мурашко Д. Т., Василевский П. Н., Герасименко А. Ю., Неволин В. К. , Бобринецкий И. И. Лазерное формирование подвешенных графеновых каналов фоточувствительных детекторов 447

Харламов Н. Р., Рябышенков А. С., Каракеян В. И. Применение интегральных показателей при оценке уровня экологической безопасности наукоемкой природно-технической геосистемы 456

Элементы интегральной электроники

Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Пространственные характеристики кремниевых фотоумножителей..... 466

Мефтахутдинов Р. М. Моделирование транзистора с плавающим затвором на основе ван-дер-ваальсового гетероперехода графен/h-BN/MoS_2 478

Максименко Ю. Н., Петросянц К. О., Силкин Д. С., Грабежова В. К. TCAD-моделирование транзистора со статической индукцией..... 489

Схемотехника и проектирование

Волобуев П. С., Коршунов А. В., Семенов А. Н. Интегральный регулятор напряжения, стабильный к шумам по цепям питания..... 504

Шумарин С. В., Фролова Т. Н. Модификация SPICE-моделей КМОП-микросхем для имитации частотного отклика кольцевого генератора на низкоинтенсивное ионизирующее облучение 514

Интегральные радиоэлектронные устройства

Маслаков М. П., Лыков О. В. Разработка устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения 525

Информационно-коммуникационные технологии

Бордюжа В., Брейкина К. В., Умняшкин С. В. Автоматизация определения числа итераций в задаче восстановления смазанных изображений методом Люси – Ричардсона 539

Конференции

Юбилейный Российский форум «Микроэлектроника 2024» ..... 2-я стр. обложки

К сведению авторов 551

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 29, No. 4, 2024
July – August
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 12.08.2024. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 17,205. Number of copies 140. Order no. 14. 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

Grigoreva T. V., Golubkov S. A., Boiko A. N. Research into *p–i–n* diode structures on high-resistivity silicon substrates using deep-level transient spectroscopy 411

Electronics materials

Khamdokhov Z. M., Margushev Z. Ch., Kalazhokov Z. Kh., Kalazhokov Kh. Kh., Kushkhov Kh. B., Teshev R. Sh. Features of the effect of a helium ion beam on an intercalated graphite film 420

Technological processes and routes

Shiryaev B. V., Argunov D. P., Zhidik Yu. S., Yushchenko A. Yu., Laptev I. V. Algorithm for automatic inspection of the surface of integrated circuits based on calculation of pixel distance 432

Nekrasov N. P., Murashko D. T., Vasilevsky P. N., Gerasimenko A. Yu., Nevolin V. K., Bobrinetskiy I. I. Laser formation of suspended graphene channels for photosensitive detectors..... 447

Kharlamov N. R., Riabyshenkov A. S., Karakeyan V. I. Application of integrated indices in making an assessment of high-tech natural-engineering geosystem environmental safety level 456

Integrated electronics elements

Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Spatial properties of silicon photomultipliers..... 466

Meftakhutdinov R. M. Simulation of a floating gate transistor based on a graphene/h-BN/MoS_2 van der Waals heterojunction 478

Maksimenko Yu. N., Petrosyants K. O., Silkin D. S., Grabezhova V. K. TCAD simulation of a static induction transistor..... 489

Circuit engineering and design

Volobuev P. S., Korshunov A. V., Semenov A. N. Integrated voltage regulator with improved stability to noise in supply networks 504

Shumarin S. V., Frolova T. N. Modification of SPICE models of CMOS microcircuits to simulate the frequency response of a ring oscillator to low-intensity ionizing radiation 514

Integrated radioelectronic devices

Maslakov M. P., Lykov O. V. Development of a device for obtaining high-quality sinusoidal alternating voltage..... 525

Information-communication technologies

Bordiuzha V., Breykina K. V., Umnyashkin S. V. Automation of determining the number of iterations in the problem of blurred images restoration by the Lucy – Richardson method..... 539

Conferences

Jubilee Russian Forum “Microelectronics 2024”..... 2nd cover page

Instruction for authors 551

Научная статья
УДК 621.382.2/.3
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-411-419
EDN: GKKWLH

Исследование *p–i–n*-диодных структур на высокоомных кремниевых подложках методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней

***Т. В. Григорьева*[1], *С. А. Голубков*[2], *А. Н. Бойко*[1]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», г. Москва, Россия*

tanya.gri.02@mail.ru

Аннотация. При проектировании выполненных на высокоомном кремнии *p–i–n*-диодных структур, чувствительных к посторонним примесям, требуется учитывать особенности технологических сред, в которых они обрабатываются, и их последующее влияние на основные характеристики изделия. Для исследования технологических примесей, которые диффундируют с поверхности в объем *p–i–n*-диодной структуры во время процесса ее изготовления, применяется метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней, характеризующийся высокой чувствительностью, возможностью определения природы примеси и др. В работе проведено исследование *p–i–n*-диодных структур, выполненных на подложках высокоомного кремния, методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней. С использованием спектроскопии показано наличие в запрещенной зоне кремния глубоких донорных уровней, обусловленных присутствием серы в теле *p–i–n*-диода. Установлено, что наличие примесной серы приводит к нежелательному снижению удельного объемного сопротивления подложки и ухудшению характеристик *p–i–n*-диода. Результаты исследования могут быть использованы при изготовлении *p–i–n*-диодов и других полупроводниковых структур на высокоомном кремнии, чувствительных к посторонним примесям.

Ключевые слова: *p–i–n*-диоды, загрязнение серой, высокоомный кремний, релаксационная спектроскопия глубоких уровней, напряжение полного обеднения

© Т. В. Григорьева, С. А. Голубков, А. Н. Бойко, 2024

Для цитирования: Григорьева Т. В., Голубков С. А., Бойко А. Н. Исследование *p–i–n*-диодных структур на высокоомных кремниевых подложках методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 411–419. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-411-419. – EDN: GKKWLH.

Original article

Research into *p–i–n* diode structures on high-resistivity silicon substrates using deep-level transient spectroscopy

***T. V. Grigoreva*[1], *S. A. Golubkov*[2], *A. N. Boiko*[1]**

[1]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[2]*JSC "Zelenograd Nanotechnology Center", Moscow, Russia*

tanya.gri.02@mail.ru

Abstract. During the design of foreign impurity-sensitive *p–i–n* diode structures made on high-resistivity silicon it is required to account the features of processing media in which they are treated and their subsequent effect on basic performance of product. The deep-level transient spectroscopy is used to study process impurities diffusing from surface into *p–i–n* diode structure contents during its manufacturing, this method is characterized by high sensitivity, the possibility to define the nature of impurity etc. In this work, *p–i–n* diode structures made on high-resistivity silicon substrates were studied by deep-level transient spectroscopy. The results of the spectroscopic study showed the occurrence of deep donor levels in the silicon band gap due to the presence of sulfur in the body of *p–i–n* diode. It has been established that the occurrence of sulfur impurity leads to an undesirable decrease in the specific volume resistance of the substrate and to *p–i–n* diode deterioration. The results of the study can be used in the manufacture of *p–i–n* diodes and other foreign impurity-sensitive semiconductor structures on high-resistivity silicon.

Keywords: *p–i–n* diodes, sulfur contamination, high-resistivity silicon, deep-level transient spectroscopy, depletion voltage

For citation: Grigoreva T. V., Golubkov S. A., Boiko A. N. Research into *p–i–n* diode structures on high-resistivity silicon substrates using deep-level transient spectroscopy. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 411–419. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-411-419. – EDN: GKKWLH.

Введение. Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений, в частности *p–i–n*-диоды, широко используются в прикладной технике, научных исследованиях, физике высоких энергий [1, 2]. Протяженная низколегированная *i*-область в приборной структуре является функциональной особенностью *p–i–n*-диодов. В то же время наличие низколегированной области приводит к тому, что *p–i–n*-структуры крайне чувствительны к различного рода примесям. Поэтому при разработке *p–i–n*-диодов необходимо уделять особое внимание влиянию нежелательных примесей, в том числе технологических загрязнений.

Негативное влияние посторонних примесей на характеристики полупроводниковых *p–i–n*-диодов исследовалось многими авторами. Например, в работе [3] продемонстрировано влияние углерода на электрические характеристики *p–i–n*-диодов: показано существование в объеме монокристаллического кремния дефектов упаковки и углерод-кислородных комплексов C_i-O_i, приводящих к ухудшению электрических характеристик. Установлено, что с увеличением концентрации углерода повышается обратный ток утечки, уменьшается время обратного восстановления, возрастает значение падения напряжения. В работе [4] показано, что углеродные примеси влияют на электродинамические характеристики *p–i–n*-диодных структур, облученных гелием. Обнаружено увеличение концентрации дырочных ловушек в структуре, которое объясняется авторами образованием комплексов C_i-O_i из углеродных загрязнений во время облучения гелием. Нежелательной донорной примесью, оказывающей влияние на характеристики полупроводниковых структур, является также сера [5, 6] – быстродиффундирующая примесь, создающая в кремнии глубокие уровни на 0,18 и 0,37 эВ ниже зоны проводимости [7].

Цель настоящей работы – исследование влияния технологически внесенных примесей на параметры экспериментальных *p–i–n*-диодных структур для совершенствования технологических процессов создания полупроводниковых приборов.

Подготовка экспериментальных образцов. Схема экспериментальной *p–i–n*-диодной структуры представлена на рис. 1. В данной структуре *p*- и *n*-области сильнолегированные, что необходимо для создания омических контактов. При подаче на *p–n*-переход напряжения обратного смещения в области обеднения (*i*-области) в структуре формируется область пространственного заряда с пониженной концентрацией свободных носителей (см. рис. 1) [8]. Малая концентрация свободных носителей заряда в подложке определяет значительную глубину проникновения поля, до второго (нижнего) электрода, позволяя достигать полного обеднения подложки.

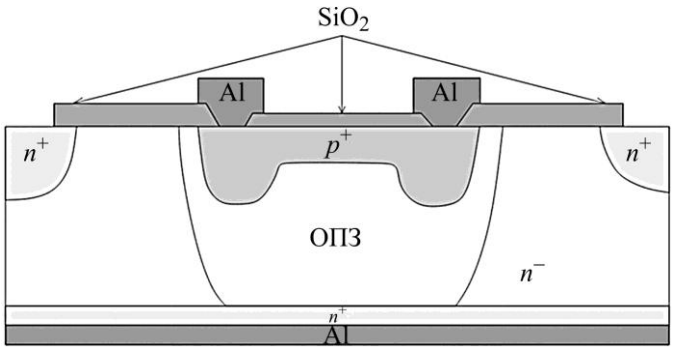


Рис. 1. Схема *p–i–n*-диодной структуры в разрезе
Fig. 1. The scheme of the *p–i–n* diode structure in the section

Экспериментальные *p–i–n*-диодные структуры изготавливали на высокоомном кремнии *n*-типа, полученном методом бестигельной зонной плавки. Использовали пластины толщиной 320 мкм с удельным объемным сопротивлением более 5 кОм/см. Технологический маршрут изготовления образцов включает ряд высокотемпературных операций: отжиг структур после ионной имплантации BF_2^+ и P; термическое окисление кремния; вжигание алюминиевых контактов. Высокотемпературные процессы, в свою очередь, способствуют проникновению в кремний быстродиффундирующих примесей, что может повлиять на проводимость кремния вплоть до инверсии ее типа. Поэтому важной особенностью эксперимента является то, что на определенных этапах пластины

из экспериментальной партии обрабатывали в разных растворах: три пластины – в растворе Каро (смесь перекиси водорода H_2O_2 и серной кислоты H_2SO_4), а три другие пластины дополнительно обрабатывали в перекисно-аммиачном растворе (ПАР) после обработки в растворе Каро. Такое разделение экспериментальных образцов необходимо для определения потенциальных источников технологически внесенных примесей.

Измерение вольт-фарадных характеристик образцов. Для определения напряжения полного обеднения и измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) *p–i–n*-диодных структур собран измерительный стенд, включающий в себя измеритель иммитанса Е7-30, источник питания и специализированную оснастку для подключения к полупроводниковым структурам зондовым способом. Схема стенда представлена на рис. 2.

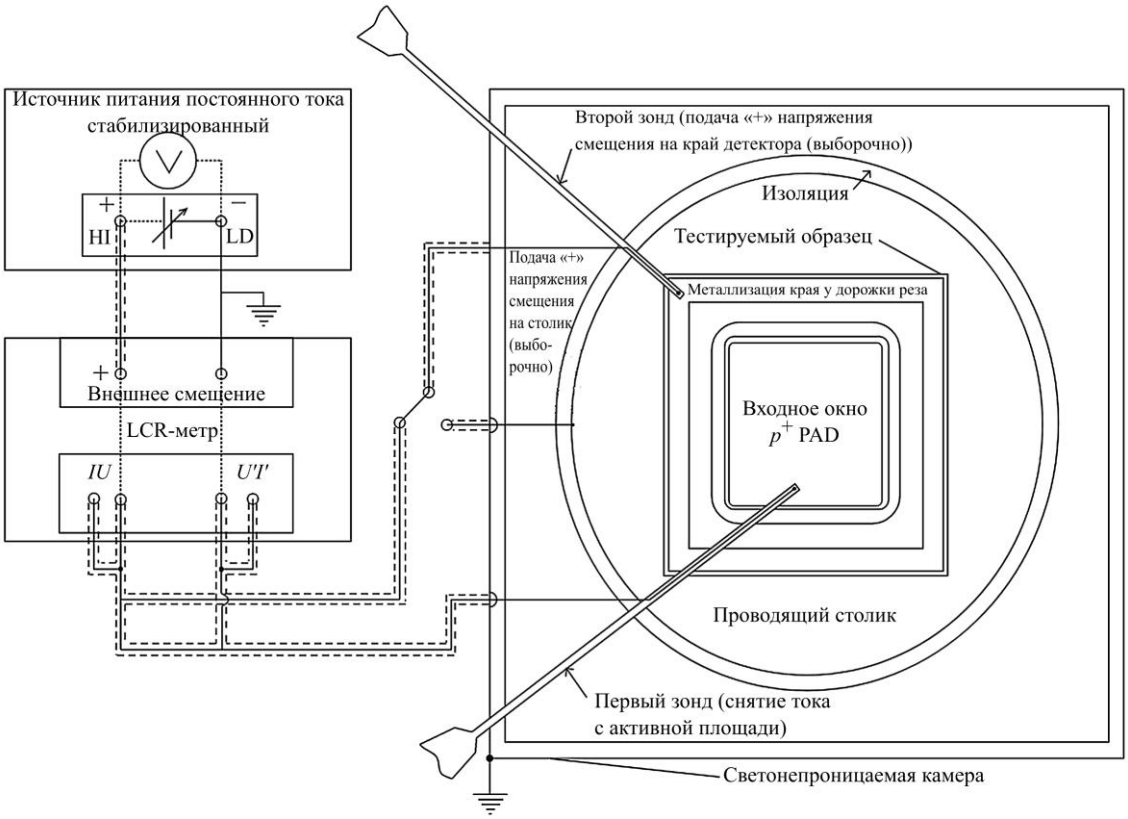


Рис. 2. Схема стенда для измерения ВФХ *p–i–n*-диодных структур
Fig. 2. Scheme of a stand for measuring the volt-farad characteristics of *p–i–n* diode structures

Полученные на стенде ВФХ перестраивали в координатных осях зависимости величины $1/C^2$ от напряжения U (рис. 3). Напряжение полного обеднения определяли по участку выхода графика на насыщение, тангенс угла наклона графика до участка насыщения характеризует удельное сопротивление подложки.

Кривые на рис. 3, полученные для образцов, обработанных с использованием разных растворов, отчетливо демонстрируют, что ВФХ при обработке в растворе ПАР имеет линейный вид до участка насыщения, меньшее напряжение полного обеднения и меньший разброс параметров от образца к образцу. Полученные при использовании ПАР характеристики проектируемых *p–i–n*-диодов можно оценить как соответствующие искомым характеристикам. В то время как при использовании раствора Каро возрастает напряжение полного обеднения, ход кривых ВФХ до области насыщения имеет

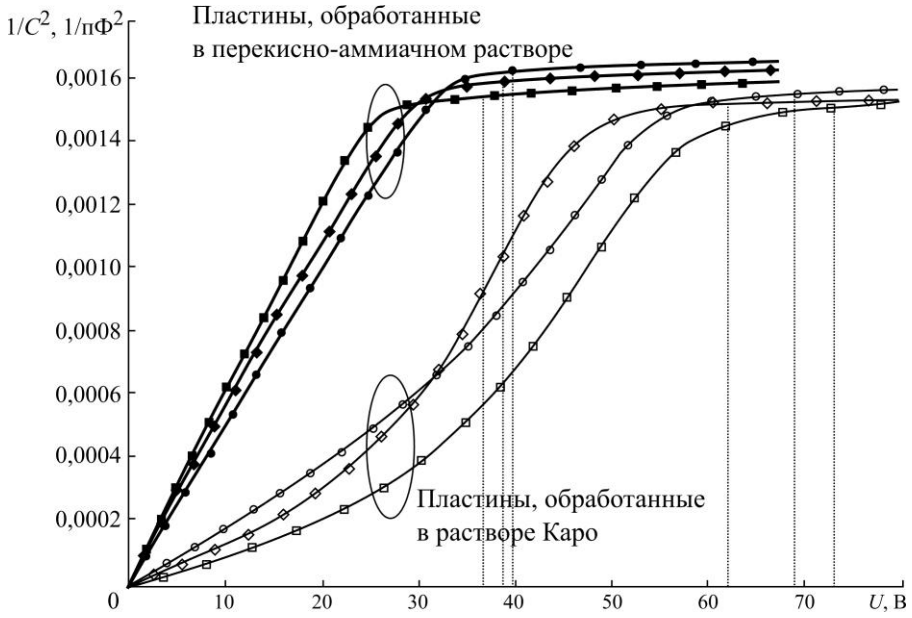


Рис. 3. ВФХ *p–i–n*-диодных структур
Fig. 3. Volt-farad characteristics of *p–i–n* diode structures

нелинейный вид и увеличивается разброс параметров у разных образцов. Исходя из этих данных сделано предположение о том, что нежелательное изменение характеристик образцов, обработанных в растворе Каро, произошло вследствие легирования пластин серой, содержащейся в этом растворе.

Исследования методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Для исследования паразитных примесей выбран метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ; Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS). Метод дает возможность определения пространственного распределения примесей, обладает высокой чувствительностью и разрешающей способностью, позволяет обнаруживать глубокие примесные уровни с разрешением по энергии около 0,03 эВ [9]. Метод зарекомендовал себя при исследовании влияния примесей на параметры полупроводников и полупроводниковых приборных структур [4, 6, 10, 11]. Аппаратно измерения методом РСГУ проводят следующим образом: образец в вакуумной камере охлаждают до температуры жидкого азота, а затем постепенно нагревают. При определенных температурах активируются глубокие уровни, которые вносят вклад в емкость обратносмещенного *p–n*-перехода (происходит релаксация емкости). Схема измерений методом РСГУ представлена на рис. 4.

Исследования влияния посторонних примесей методом РСГУ проводили в диапазоне температур 77–300 К на пяти экспериментальных *p–i–n*-диодных структурах, обработанных в растворе Каро, с активной площадью 1 см^2 (рис. 5). Результаты исследований энергетических характеристик экспериментальных *p–i–n*-диодных структур представлены в табл. 1 и 2.

Анализ полученных данных по генерационным центрам позволяет сделать вывод, что изменение энергетических состояний определяется влиянием примесной серы, которая может находиться в двух состояниях – S и S_2 [12, 13]. Сера, имея энергию активации 0,18 и 0,37 эВ, действует как центр глубокого донорства в кремнии [14]. Полученные данные коррелируют с аналогичными исследованиями кремниевых образцов, легированных серой [6].

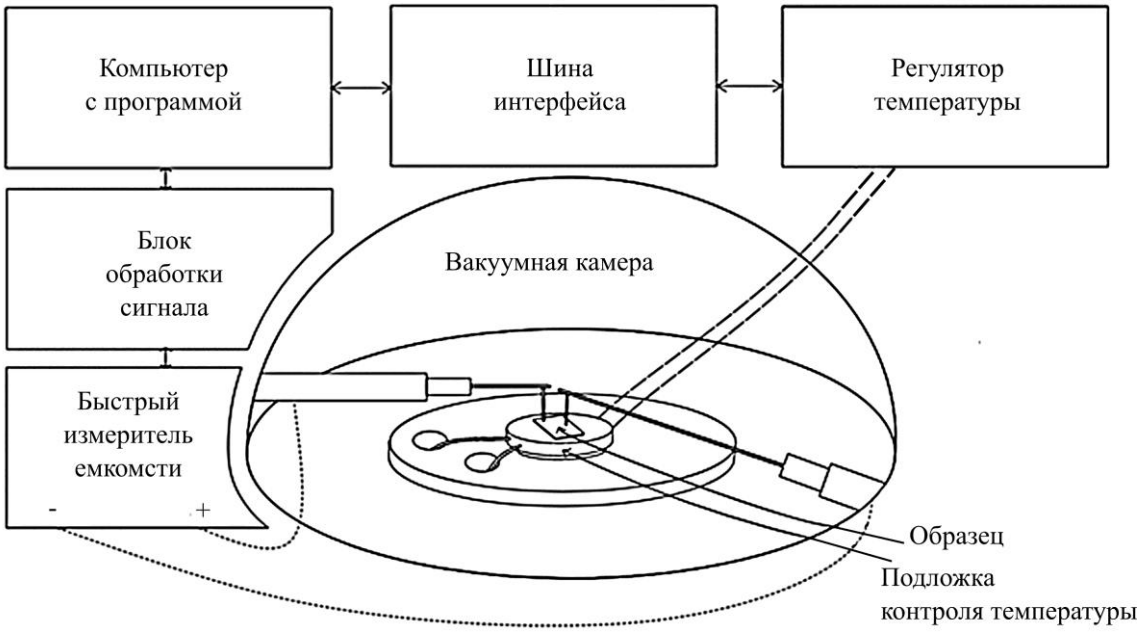


Рис. 4. Схема проведения измерений методом РСГУ
Fig. 4. The scheme of measurements by the DLTS method

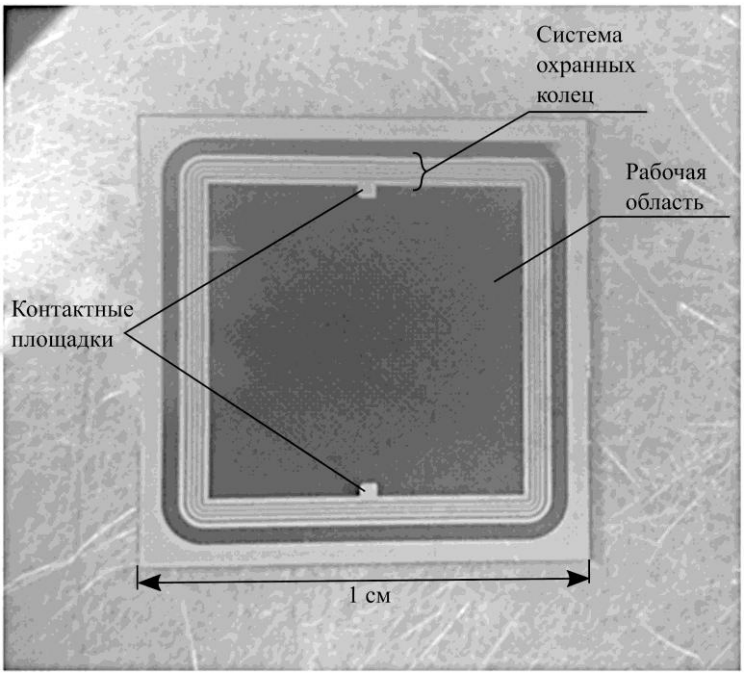


Рис. 5. Изображение экспериментального образца, полученное в оптическом микроскопе
Fig. 5. An image of an experimental sample obtained in an optical microscope

Таблица 1

Результаты исследования примесных уровней методом РСГУ

Table 1

Results of the study of impurity levels by deep-level transient spectroscopy

Номер генерационного центра	Энергия уровня генерационного центра E_c, эВ	Сечение захвата, см^2	Природа генерационного центра
D_1	0,16	$4{,}0\cdot10^{-16}$	S_2
D_{2a}	0,255	$1{,}0\cdot10^{-16}$	S_2
D_{2b}	0,271	$1{,}4\cdot10^{-17}$	S
D_3	0,55	$3{,}3\cdot10^{-15}$	S

Таблица 2

Результаты определения концентрации глубоких уровней методом РСГУ

Table 2

Results of test for deep levels concentration by deep-level transient spectroscopy

Номер образца	Концентрация генерационных центров, см$^{-3}$			
	D_1	D_{2a}	D_{2b}	D_3
1	$8{,}0\cdot10^{9}$	–	$1{,}5\cdot10^{10}$	$1{,}5\cdot10^{10}$
2	$7{,}0\cdot10^{9}$	$6{,}2\cdot10^{8}$	$9{,}0\cdot10^{9}$	$9{,}0\cdot10^{9}$
3	$7{,}5\cdot10^{9}$	–	$1{,}15\cdot10^{11}$	$9{,}5\cdot10^{10}$
4	$8{,}6\cdot10^{9}$	$1{,}45\cdot10^{9}$	$4{,}7\cdot10^{10}$	$4{,}9\cdot10^{10}$
5	$6{,}7\cdot10^{9}$	–	$2{,}0\cdot10^{11}$	$1{,}6\cdot10^{11}$

Коэффициент диффузии серы в кремнии достаточно высокий и составляет $3{,}4\cdot10^{-8}$ м^2/с при 1100 °С. Это может привести к тому, что при определенных условиях сера будет диффундировать в объем подложки на значительную глубину, представляя собой быстродиффундирующую примесь [15]. В процессе нежелательного распределения примеси по объему значима неравновесная ускоренная диффузия, происходящая в имплантированном кремнии при термообработках [16]. Это явление объясняется взаимодействием примесей с собственными междоузельными атомами кремния и вакансиями, формируемыми в большой концентрации при имплантации. Так как концентрация донорной примеси в исходной подложке мала и составляет порядка 10^{11}–10^{12} см$^{-3}$, небольшие концентрации серы, предельная растворимость которой в кремнии составляет около $2\cdot10^{15}$ см$^{-3}$ [7, 17], могут значительно изменять удельное сопротивление подложки [15].

Заключение. Проведенные исследования с применением метода РСГУ показали, что использование в технологии создания *p–i–n*-диодов раствора Каро может приводить к нежелательному легированию образцов донорной примесью серы и значительному ухудшению характеристик приборных структур. Из-за примесной серы в запрещенной зоне кремния образуются дополнительные энергетические уровни. Это, в свою очередь, приводит к увеличению напряжения полного обеднения *p–i–n*-диодов и является нежелательным эффектом.

Результаты работы могут быть использованы в полупроводниковой электронике, в частности при создании структур на основе высокоомного кремния, а также при исследовании полупроводниковых структур методом РСГУ.

Материалы статьи доложены на 7-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника – 2023» (31 января – 06 февраля 2023 г., Кабардино-Балкарская Республика, пос. Эльбрус).

Литература

1. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / ***Ю. К. Акимов, О. В. Игнатьев, А. И. Калинин, В. Ф. Кушнирук***; под ред. Ю. К. Акимова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.

2. ***Соминский М. С.*** Полупроводники. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1967. 440 с.

3. Effects of carbon impurity in monocrystalline silicon on electrical properties and the mechanism analysis of PIN rectifier diodes / ***X. Sun, H. Guo, Y. Zhang et al.*** // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 22868–22875. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055279

4. Impact of carbon impurities in silicon PIN diodes on electrical dynamic characteristics / ***T. Sugiyama, M. Yamazaki, F. Niwa et al.*** // R&D Review of Toyota CRDL. 2012. Vol. 43. Iss. 1. P. 61–68.

5. ***Carlson R. O., Hall R. N., Pell E. M.*** Sulfur in silicon // J. Phys. Chem. Solids. 1959. Vol. 8. P. 81–83. https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90279-3

6. Detection of sulfur-related defects in sulfur diffused *n*- and *p*-type Si by DLTS / ***K. Gwozdz, V. Kolkovsky, J. Weber et al.*** // Phys. Status Solidi A. 2019. Vol. 216. Iss. 17. Art. No. 1900303. https://doi.org/10.1002/pssa.201900303

7. О растворимости серы в кремнии / ***В. Б. Шуман, А. А. Махова, Ю. А. Астров и др.*** // ФТП. 2012. Т. 46. № 8. С. 993–994. EDN: RCQUCR.

8. Review of photodetectors characterization methods / ***Z. Bielecki, K. Achtenberg, M. Kopytko et al.*** // Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci. 2022. Vol. 70. No. 2. Art. No. e140534. https://doi.org/10.24425/bpasts.2022.140534

9. ***Чопра К. Л., Дас С. Р.*** Тонкопленочные солнечные элементы / сокр. пер. с англ. И. П. Гавриловой; под ред. М. М. Колтуна. М.: Мир, 1986. 440 с.

10. ***Литвинов В. Г., Гудзев В. В., Милованова О. А., Рыбин Н. Б.*** Релаксационная спектроскопия полупроводниковых микро- и наноструктур // Вестник Рязанского гос. радиотехн. ун-та. 2009. № 30. С. 62–70. EDN: KXTWMD.

11. DLTS study of defects in HgCdTe heterostructure photodiode / ***K. Majkowycz, K. Murawski, T. Manyk et al.*** // J. Electron. Mater. 2023. Vol. 52. P. 7074–7080. https://doi.org/10.1007/s11664-023-10653-x

12. ***Ахметов Н. С.*** Общая и неорганическая химия. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1998. 743 с.

13. ***Rosier L. L., Sah C. T.*** Thermal emission and capture of electrons at sulfur centers in silicon // Solid-State Electronics. 1971. Vol. 14. Iss. 1. P. 41–54. https://doi.org/10.1016/0038-1101(71)90047-5

14. Deep level analysis of radiation-induced defects in Si crystals and solar cells / ***M. Yamaguchi, A. Khan, S. J. Taylor et al.*** // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 86. Iss. 1. P. 217–223. https://doi.org/10.1063/1.370698

15. Перераспределение глубоких примесей селена и серы в кремнии при легировании поверхности фосфором / ***Ю. А. Астров, В. А. Козлов, А. Н. Лодыгин и др.*** // ФТП. 2009. Т. 43. № 6. С. 739–744. EDN: RCPYCJ.

16. ***Мильчанин О. В., Комаров Ф. Ф., Плебанович В. И., Комаров А. Ф.*** Совместная с ионами $BF2^+$ имплантация углерода при создании p^+–n-переходов в кремнии // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 7-й Междунар. конф. (Минск, 26–28 сент. 2007). Минск: Изд. центр БГУ, 2007. С. 208–210. EDN: LMVNKM.

17. Актуальные проблемы материаловедения: сб. обзоров / пер. с англ. под ред. ***Е. И. Гиваргизова, М. М. Колтуна***. Вып. 1. М.: Мир, 1982. 271 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.01.2024 г.; принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Григорьева Татьяна Валерьевна – студентка Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tanya.gri.02@mail.ru

Голубков Сергей Александрович – ведущий инженер-технолог АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), golubkov@zntc.ru

Бойко Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), anton.bojko@mail.ru

References

1. Akimov Yu. K. (auth., ed.), Ignat'yev O. V., Kalinin A. I., Kushniruk V. F. Semiconductor detectors in experimental physics. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 344 p. (In Russian).

2. Sominskiy M. S. *Semiconductors.* Leningrad, Nauka. Leningr. otd-niye, 1967. 440 p. (In Russian).

3. Sun X., Guo H., Zhang Y., Li X., Cao Z. Effects of carbon impurity in monocrystalline silicon on electrical properties and the mechanism analysis of PIN rectifier diodes. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 22868–22875. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055279

4. Sugiyama T., Yamazaki M., Niwa F., Kameyama S., Misumi T., Kanata T., Nishiwaki K., Ishiko M. Impact of carbon impurities in silicon PIN diodes on electrical dynamic characteristics. *R&D Review of Toyota CRDL*, 2012, vol. 43, iss. 1, pp. 61–68.

5. Carlson R. O., Hall R. N., Pell E. M. Sulfur in silicon. *J. Phys. Chem. Solids*, 1959, vol. 8, pp. 81–83. https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90279-3

6. Gwozdz K., Kolkovsky V., Weber J., Yakovleva A. A., Astrov Yu. A. Detection of sulfur-related defects in sulfur diffused *n*- and *p*-type Si by DLTS. *Phys. Status Solidi A*, 2019, vol. 216, iss. 17, art. no. 1900303. https://doi.org/10.1002/pssa.201900303

7. Shuman V. B., Makhova A. A., Astrov Yu. A., Ivanov A. M., Lodygin A. N. Solubility of sulfur in silicon. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, iss. 8, pp. 969–970. https://doi.org/10.1134/S1063782612080209

8. Bielecki Z., Achtenberg K., Kopytko M., Mikołajczyk J., Wojtas J., Rogalski A. Review of photodetectors characterization methods. *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, 2022, vol. 70, no. 2, art. no. e140534. https://doi.org/10.24425/bpasts.2022.140534

9. Chopra K. L., Das S. R. *Thin film solar cells.* New York, Springer, 1983. xvi, 607 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0418-8

10. Litvinov V. G., Gudzev V. V., Milovanova O. A., Rybin N. B. Transient spectroscopy of semiconductor micro- and nanostructures. *Vestnik Ryazanskogo gos. radiotekhn. un-ta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2009, no. 30, pp. 62–70. (In Russian). EDN: KXTWMD.

11. Majkowycz K., Murawski K., Manyk T., Kopytko M., Martyniuk P. DLTS study of defects in HgCdTe heterostructure photodiode. *J. Electron. Mater.*, 2023, vol. 52, pp. 7074–7080. https://doi.org/10.1007/s11664-023-10653-x

12. Akhmetov N. S. *General and inorganic chemistry.* 3rd ed., rev. and upd. Moscow, Vyssh. shk., 1998. 743 p. (In Russian).

13. Rosier L. L., Sah C. T. Thermal emission and capture of electrons at sulfur centers in silicon. *Solid-State Electronics*, 1971, vol. 14, iss. 1, pp. 41–54. https://doi.org/10.1016/0038-1101(71)90047-5

14. Yamaguchi M., Khan A., Taylor S. J., Ando K., Yamaguchi T., Matsuda S., Aburaya T. Deep level analysis of radiation-induced defects in Si crystals and solar cells. *J. Appl. Phys.*, 1999, vol. 86, iss. 1, pp. 217–223. https://doi.org/10.1063/1.370698

15. Astrov Yu. A., Kozlov V. A., Lodygin A. N., Portsel L. M., Shuman V. B., Gurevich E. L., Hergenröder R. Redistribution of deep selenium and sulfur impurities in silicon upon surface doping with phosphorus. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 6, pp. 710–715. https://doi.org/10.1134/S1063782609060049

16. Mil'chanin O. V., Komarov F. F., Plebanovich V. I., Komarov A. F. Joint implantation of carbon with BF_2^+ ions in the creation of p^+–n junctions in silicon. *Vzaimodeystviye izlucheniy s tverdym telom*, proceedings of 7th International conf. (Minsk, Sep. 26–28, 2007). Minsk, BSU Publ. Center, 2007, pp. 208–210. (In Russian). EDN: LMVNKM.

17. Kaldis E., ed. *Current topics in materials science*, collection of reviews. Vol. 4. Amsterdam, Elsevier North-Holland, 1980. 596 p.

The article was submitted 26.12.2023; approved after reviewing 10.01.2024;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Tatyana V. Grigoreva – Student of the National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tanya.gri.02@mail.ru

Sergey A. Golubkov – Leading Process Engineer of JSC "Zelenograd Nanotechnology Center" (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya prwy, 6), golubkov@zntc.ru

Anton N. Boiko – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), anton.bojko@mail.ru

Научная статья
УДК 681.51.011
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-420-431
EDN: CYHFZH

Особенности воздействия пучка ионов гелия на пленку интеркалированного графита

З. М. Хамдохов[1], З. Ч. Маргушев[1], З. Х. Калажоков[1,2], Х. Х. Калажоков[2], Х. Б. Кушхов[2], Р. Ш. Тешев[2]

[1]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, г. Нальчик, Россия
[2]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия

hamdohov@mail.ru

Аннотация. Интеркалированный графит – перспективный углеродный материал для применения в качестве автоэмиссионных сред, так как в них можно синтезировать углеродные наноструктуры с помощью несложных экспериментов. Однако в литературе нет достаточных данных о влиянии ионного воздействия на физические свойства интеркалированного графита. В работе исследованы морфология поверхности и структура композитных пленок на основе интеркалированного графита, полученного путем обработки порошка из графита и примесей Fe, Ni, Y_2O_3, Cr в окислительном растворе азотной и серной кислот. Показаны изменения пленок, происходящие под действием бомбардировки ионами гелия. Установлено, что полученные пленки содержат две модификации графита с различными межплоскостными расстояниями – гексагональную P 63mc (0,247 нм) и метастабильную ромбоэдрическую R-3m (0,246 нм). Продемонстрировано, что РФЭС-спектры уровня C 1s соответствуют кристаллическому углероду с различной степенью гидрогенизации химической структуры. Выявлено, что пленки характеризуются отсутствием упорядоченной структуры рельефа поверхности и состоят из случайно ориентированных агрегатов частиц. Обнаружено образование чешуек графита, имеющих различные формы и толщину примерно несколько десятков нанометров. Отмечено незначительное изменение морфологии поверхности образцов, прошедших активацию гелиевой плазмой. Определено, что графитоподобные sp^2-кластеры более устойчивы к ионному облучению, чем sp^3-кластеры. Показано, что в процессе бомбардировки пленки ионами гелия происходит перестройка sp^3-кластеров в более устойчивые химические структуры C–O, C–O–C и C=O. Средний размер sp^2-кластеров ~ 5 нм.

© З. М. Хамдохов, З. Ч. Маргушев, З. Х. Калажоков, Х. Х. Калажоков, Х. Б. Кушхов, Р. Ш. Тешев, 2024

Ключевые слова: интеркалированный графит, подложки из нержавеющей стали, аморфный углерод, карбид железа, комбинационное рассеяние света, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Для цитирования: Особенности воздействия пучка ионов гелия на пленку интеркалированного графита / З. М. Хамдохов, З. Ч. Маргушев, З. Х. Калажоков и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 420–431. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-420-431. – EDN: CYHFZH.

Original article

Features of the effect of a helium ion beam on an intercalated graphite film

Z. M. Khamdokhov[1], Z. Ch. Margushev[1], Z. Kh. Kalazhokov[1,2], Kh. Kh. Kalazhokov[2], Kh. B. Kushkhov[2], R. Sh. Teshev[2]

[1]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia
[2]Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia

hamdohov@mail.ru

Abstract. Intercalated graphite is a promising carbon material to be applied as an autoemission media because it is possible to synthesize carbon nanostructure in them by the means of unsophisticated experiments. However, there is no sufficient data in the literature on the effect of ionic action on physical properties of intercalated graphite. In this work, the surface morphology and structure of composite films based on intercalated graphite obtained by treating graphite powder and Fe, Ni, Y_2O_3, Cr doping materials in an oxidizing solution of nitric and sulfuric acids are studied. The changes in films that occur by the action of helium ion bombardment are shown. It has been established that the resulting films contain two modifications of graphite with different interplanar distances – hexagonal P 63mc (0.247 nm) and metastable rhombohedral R-3m (0.246 nm). It was demonstrated that XPS spectra at the C 1s level correspond to crystalline carbon with varying degrees of chemical structure hydrogenation. It was found that the films are characterized by the absence of an ordered surface relief structure and consist of randomly oriented aggregates of particles. The formation of graphite flakes having various shapes and a thickness of approximately several tens of nanometers was discovered. A slight change in the surface morphology of the samples that were activated by helium plasma was noted. It was defined that graphite-like sp^2 clusters are more resistant to ion irradiation than sp^3 clusters. It was demonstrated that during film bombardment with helium ions the sp^3 clusters are rearranged into more stable C–O, C–O–C and C=O chemical structures. The average size of sp^2 clusters is ~ 5 nm.

Keywords: intercalated graphite, stainless steel substrates, amorphous carbon, iron carbide, Raman scattering, X-ray photoelectron spectroscopy

For citation: Khamdokhov Z. M., Margushev Z. Ch., Kalazhokov Z. Kh., Kalazhokov Kh. Kh., Kushkhov Kh. B., Teshev R. Sh. Features of the effect of a helium ion beam on an intercalated graphite film. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 420–431. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-420-431. – EDN: CYHFZH.

Введение. Применение графита в эмиссионной электронике обусловлено возможностью его использования в условиях технического вакуума, устойчивостью к бомбардировке ионами остаточных газов и стабильной эмиссией на протяжении длительного времени, а также невысокой стоимостью. Одним из перспективных углеродных материалов для применения в автоэмиссионных катодах является интеркалированный графит, обладающий уникальными свойствами и в связи с этим представляющий научный и практический интерес. Процесс интеркаляции заключается во внедрении примеси между углеродными слоями графита, что приводит к его расслаиванию и формированию нового наноструктуированного материала. При этом существует множество веществ, которые можно применять для интеркалирования графита [1].

Традиционно интеркалированный графит получают путем обработки графита в окислительном растворе азотной и серной кислот [2]. Основное преимущество данного метода – сокращение издержек и несложная модификация свойств при производстве.

Интеркалированный графит широко используется в качестве носителя катализаторов, для изготовления автоэмиссионных (холодных) катодов [3]. Для улучшения эмиссионных характеристик в материалы внедряют активные вещества – окислы редкоземельных элементов, иттрий и другие металлы [4–7]. В работе [5] для изготовления холодного катода использовали интеркалированный пирографит, легированный барием, стронцием и кальцием. Увеличение тока холодного катода до требуемого уровня достигается путем активации примеси в эмиссионных средах в процессе термического отжига или бомбардировки ионами инертных газов [4]. Авторы работы [8] получили обнадеживающий результат при использовании радиационной обработки холодных катодов из массивных углеродных пластин и пластин высокоориентированного пиролитического графита. В литературе имеются сведения о перестройке структуры интеркалированного графита в результате нагрева [9]. Однако нет достаточных данных о влиянии ионного воздействия на его физические свойства. В настоящее время наиболее перспективны для изготовления холодных катодов углеродные материалы с развитой поверхностью, содержащие эмиссионные центры – углеродные наноструктуры, например графитоподобные sp^2-кластеры [10]. В работе [11] для изготовления холодных катодов использовали пленки коллоидного графита, содержащие эмиссионные центры (sp^2-кластеры). В связи с этим возрос интерес к применению интеркалированных графитов в качестве автоэмиссионных сред, поскольку в них можно синтезировать углеродные наноструктуры с помощью сравнительно простых экспериментов.

Цель настоящей работы – разработка метода получения пленок интеркалированного графита, состоящих из углеродных наноструктур, а также исследование влияния бомбардировки ионами гелия на их поверхность и структуру.

Эксперимент. Для создания пленок интекалированного графита на подложках из нержавеющей стали исходную смесь изготавливали из порошков мелкокристаллического графита и каталитически активных компонентов Fe, Ni, Y_2O_3 и Cr, которые широко применяются для синтеза углеродных наноструктур. Используемые для формирования пленок частицы порошков имели размеры порядка нескольких десятков микрометров. Смесь тщательно перемешивали и затем заливали раствором, содержащим серную и азотную кислоты в соотношении по весу 10:1 соответственно. Полученный осадок промывали в дистиллированной воде и в виде пасты с помощью ракеля на-

носили на поверхность подложки из нержавеющей стали. Подложки с нанесенным слоем толщиной ~ 100 мкм просушивали на воздухе при температуре 90 °С в течение 1 ч. Толщину формируемого слоя контролировали с помощью микрометра. В результате получены композитные пленки интеркалированного графита, пропитанные катализаторами углеродных наноструктур.

Полученные образцы подвергали бомбардировке ионами гелия с энергией 7 кэВ в течение 15 мин с помощью источника ионного травления типа «Радикал» (рис. 1). Исследование морфологии поверхности и элементного состава образцов проводили с помощью растрового электронного микроскопа VEGA 3LMH; рентгенофазный анализ пленок интеркалированного графита – на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6. Спектры комбинационного рассеяния (КРС) пленок получены с помощью спектрометра Ntegra Spektra (Россия) с длиной волны лазера 633 нм.

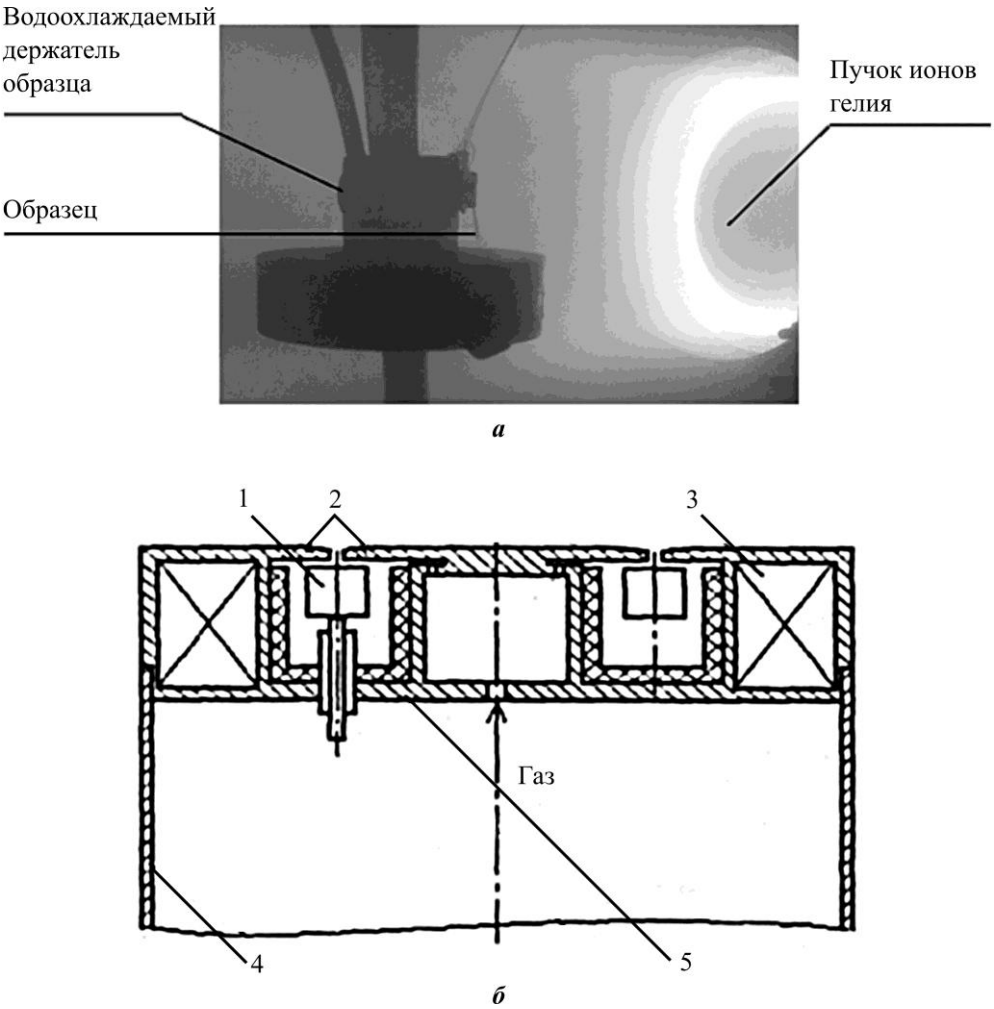
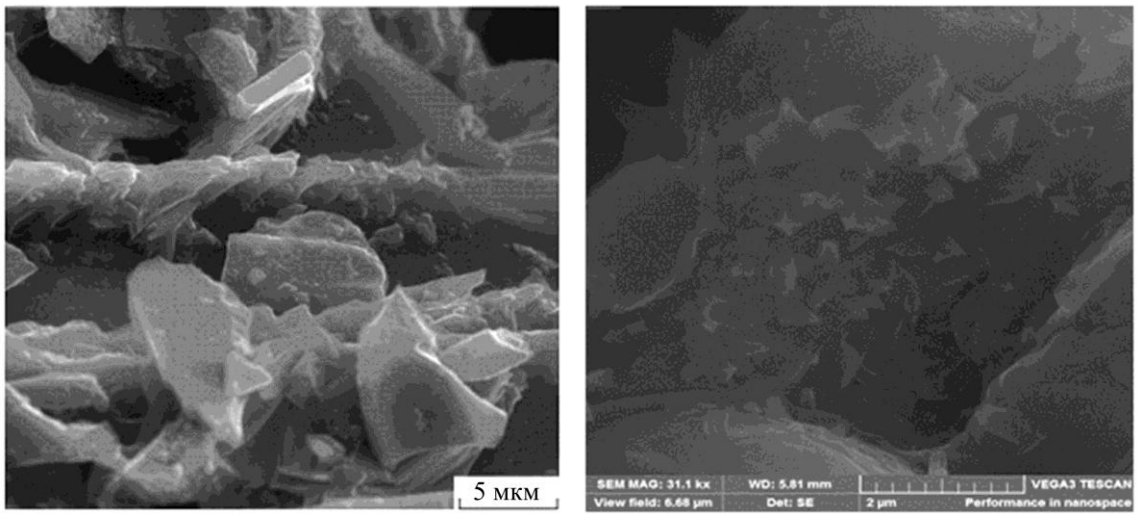


Рис. 1. Источник ионного травления: *а* – фотография гелиевой плазмы; *б* – схема источника ионов (1 – кольцевой анод; 2 – катод; 3 – электромагнитная катушка; 4 – защитный кожух; 5 – магнитопровод)

Fig. 1. Ion etching source: *a* – photo of helium plasma; *b* – ion source diagram (1 – annular anode; 2 – cathode; 3 – electromagnetic coil; 4 – protective casing; 5 – magnetic circuit)

Химический состав пленок интеркалированного графита исследовали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием спектрометра «K-Alpha» (Termo Scientific, США) с источником рентгеновского излучения Al-*K*α(1486,6 эВ) при вакууме не хуже $4{,}5 \cdot 10^{-9}$ мбар. Вычитание фона вторичных электронов проводили методом Тугарда.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведены электронные микрофотографии поверхности исходных пленок интеркалированного графита. Как видно, для пленок характерно отсутствие упорядоченной структуры рельефа поверхности и они состоят из случайно ориентированных агрегатов частиц и графитовых чешуек.

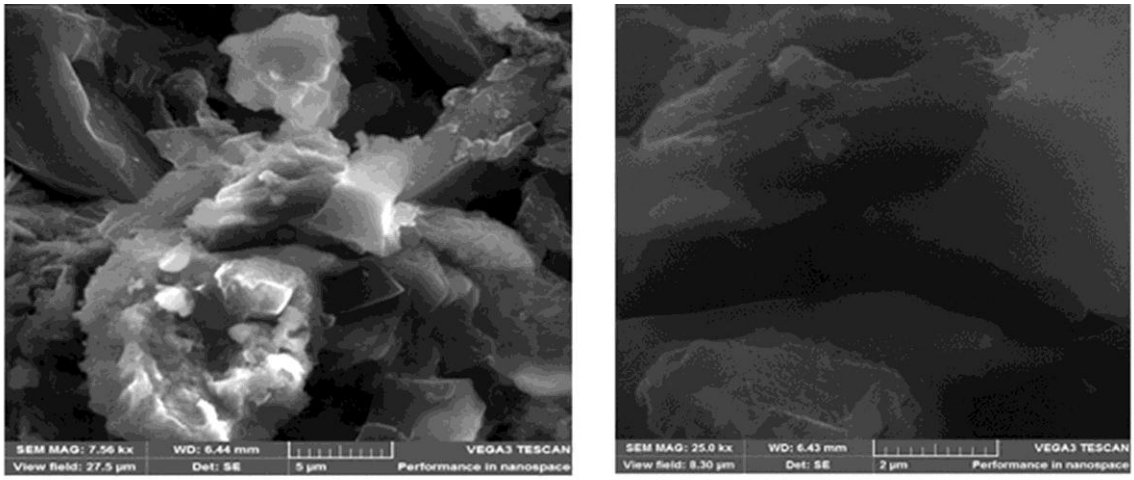


а *б*

Рис. 2. Микрофотографии поверхности образцов интеркалированного графита до облучения:
а – увеличение × 7560; *б* – увеличение × 31 000
Fig. 2. Micrographs of the surface of intercalated graphite samples before irradiation:
a – magnification × 7560; *b* – magnification × 31,000

На рис. 3 приведены микрофотографии поверхности образцов после облучения при увеличении в 7560 и 25 100 раз. Видно, что чешуйки графита имеют различные формы и толщину примерно несколько десятков нанометров. Вместе с тем наблюдается неполное разделение графитовых чешуек, что позволяет интеркалированному графиту оставаться единым целым. Кроме того, следует отметить незначительное изменение морфологии поверхности образцов, прошедших дополнительную активацию гелиевой плазмой.

Результаты структурного микроанализа отдельно взятого образца показаны на рис. 4. Можно сделать вывод о том, что на качественном уровне содержание компонентов в полученной пленке интеркалированного графита близко к составу исходных порошков. На рис. 5 представлена рентгенограмма исходной пленки интеркалированного графита. Полученные на основе рентгенограммы значения межплоскостных расстояний указывают на присутствие в пленке двух модификаций графита с различными межплоскостными расстояниями – гексагональной P 63mc (0,247 нм) и метастабильной ромбоэдрической R-3m (0,246 нм). На рис. 6 представлены РФЭС-спектры уровня C 1s пленки интеркалированного графита до и после активации ионами гелия.



а ***б***

Рис. 3. Микрофотографии поверхности образцов интеркалированного графита после облучения:
а – увеличение × 7560; *б* – увеличение × 25 000
Fig. 3. Micrographs of the surface of intercalated graphite samples after irradiation:
a – magnification × 7560; *b* – magnification × 25,000

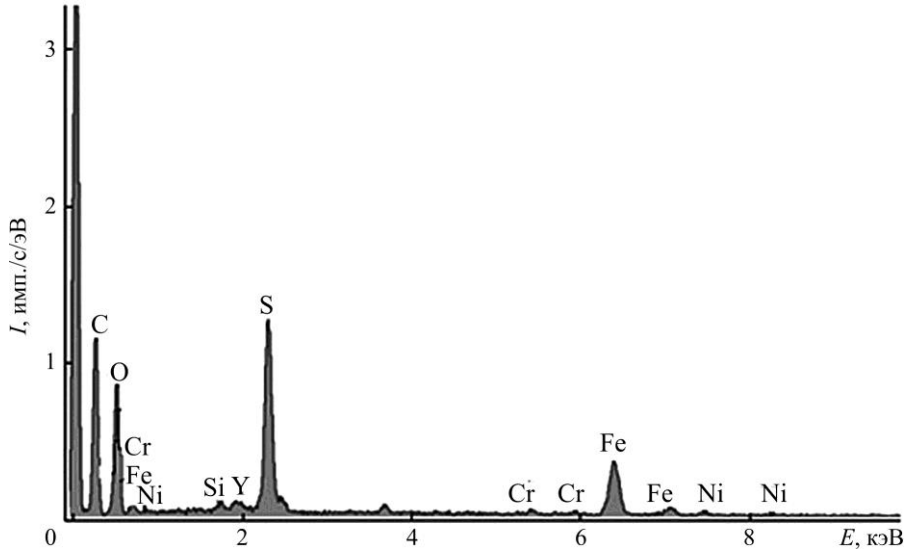


Рис. 4. Результаты элементного анализа пленки интеркалированного графита
Fig. 4. Results of elemental analysis of the intercalated graphite film

Для устранения смещения пиков вследствие зарядки поверхности образца использовали компенсирующую электронную пушку, встроенную в систему. Возможное смещение спектров вследствие остаточной заряженности спектра контролировали по положению компонента линии C 1s с наименьшим значением энергии связи и приравненного к 284,4 эВ, который совпадает с положением группы C=C sp^2 кристаллического углерода на поверхности [12, 13].

Разложение спектра C 1s проводили с учетом присутствия углерода в sp^2-гибридизации C=C. Это в целом задает асимметрию наиболее интенсивной части спектра, и для его описания использовали функцию Лоренца с характерной асимметрией [13], а также связанный с ним пик сателлита (shake-up π-π* satellite), составляющий по интенсивности ~ 0,07 от пика C–C sp^2. Для корректного описания высокоэнергетической

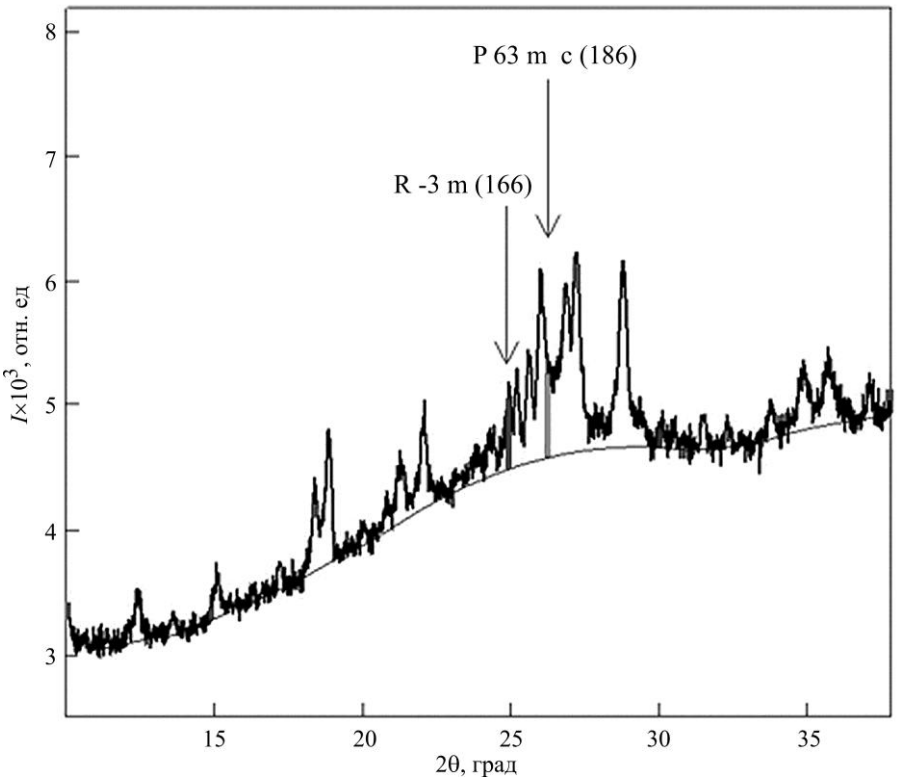


Рис. 5. Рентгенограмма исходной пленки интеркалированного графита
Fig. 5. X-ray image of the initial intercalated graphite film

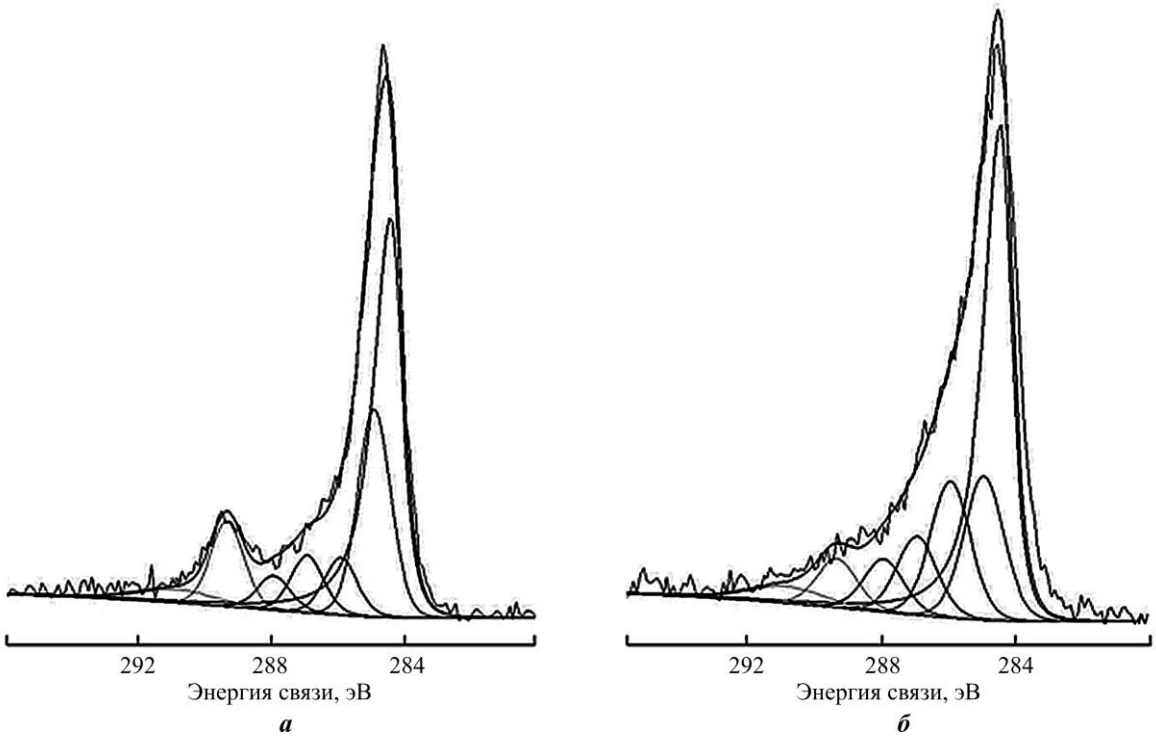


Рис. 6. РФЭС-спектры уровня C 1s пленки интеркалированного графита до (*а*) и после (*б*) активации ионами гелия
Fig. 6. XPS spectra of the C 1s level of the intercalated graphite film before (*a*) and after (*b*) activation by helium ions

части спектра учтен пик аморфного углерода (C–C/C–-H) и групп C–O, C–O–C, C=O, O–C=O, для описания которых использовали функции Войта в соотношении 30 % Лоренца и 70 % Гаусса. Отличие этих спектров от стандартного спектра высокоориентированного пиролитического графита может быть объяснено гидрогенизацией образцов [13, 14]. Это более заметно для активированной поверхности образца, в химической структуре которого в большей степени участвуют группы C–O и C–O–C.

В таблице приведены результаты анализа химических состояний атомов углерода образцов до и после активации гелиевой плазмой. Из таблицы следует, что после бомбардировки ионами гелия содержание в пленке sp^2-кластеров практически не меняется, в то время как содержание sp^3-кластеров уменьшается в результате их перестройки в более устойчивые химические структуры C–O, C–O–C и C=O. Средний размер sp^2-кластеров ~ 5 нм.

Химическое состояние атомов углерода на поверхности образцов интеркалированного графита до и после активации
Chemical state of carbon atoms on the surface of intercalated graphite samples before and after activation

Группа	Энергия связи, эВ	Полуширина на полувысоте	Относительное содержание, ат. %	
			до активации	после активации
C=Csp^2	284,46	0,8	47,56	47,07
C–C/C–H sp^3	284,9	1,4	23,13	15,53
C–O	285,9	1,4	6,34	14,72
C–O–C	286,9	1,4	6,35	8,44
C=O	287,9	1,4	3,79	5,68
O–C=O	289,3	1,4	9,50	5,25
sat	290,8	2,7	3,33	3,29

На рис. 7, *а* показан КРС-спектр, полученный для исходного образца интеркалированного графита. На спектре присутствуют линии D, G и T: пик D вблизи ~ 11 352 $см^{-1}$ возникает в образцах с большим количеством структурных дефектов; линия G в области ~ 1582 $см^{-1}$ связана с колебанием атомов во взаимно противоположных направлениях в плоскости одного атомарного слоя; пик T обусловлен связями C–C sp^3 [15, 16] на частоте ~ 1060 $см^{-1}$. Высокая интенсивность линии T указывает на сильную аморфизацию пленок и преобладание в них атомов в sp^3-состоянии гибридизации.

На рис. 7, *б* приведен КРС-спектр образца, прошедшего обработку ионами гелия. В спектре образца наблюдается исчезновение пика T, что свидетельствует об уменьшении содержания sp^3-фракции и возрастании степени упорядочения структуры пленки. Это можно объяснить тем, что в процессе бомбардировки подвижность атомов углерода sp^3-кластеров увеличивается и они перестраиваются в более устойчивые химические структуры [17]. Кроме того, сравнительный анализ показал, что в КРС-спектре после облучения гелиевой плазмой наблюдается увеличение интенсивности пика D по сравнению с пиком G. Это подтверждает уменьшение количества sp^3-кластеров в пленке.

На основе расчета отношений амплитуд пиков D и G, полученных из КРС-спектров до облучения D (~ 160 о.е.), G (~ 145 о.е.) и после D (~ 74 о.е.) , G (~ 63 о.е.), а также графика зависимости отношения амплитуд от размеров нанокристаллов, предложенного в работе [18], сделана оценка среднего размера sp^2-кластера, который равен ~ 5 нм до и после облучения.

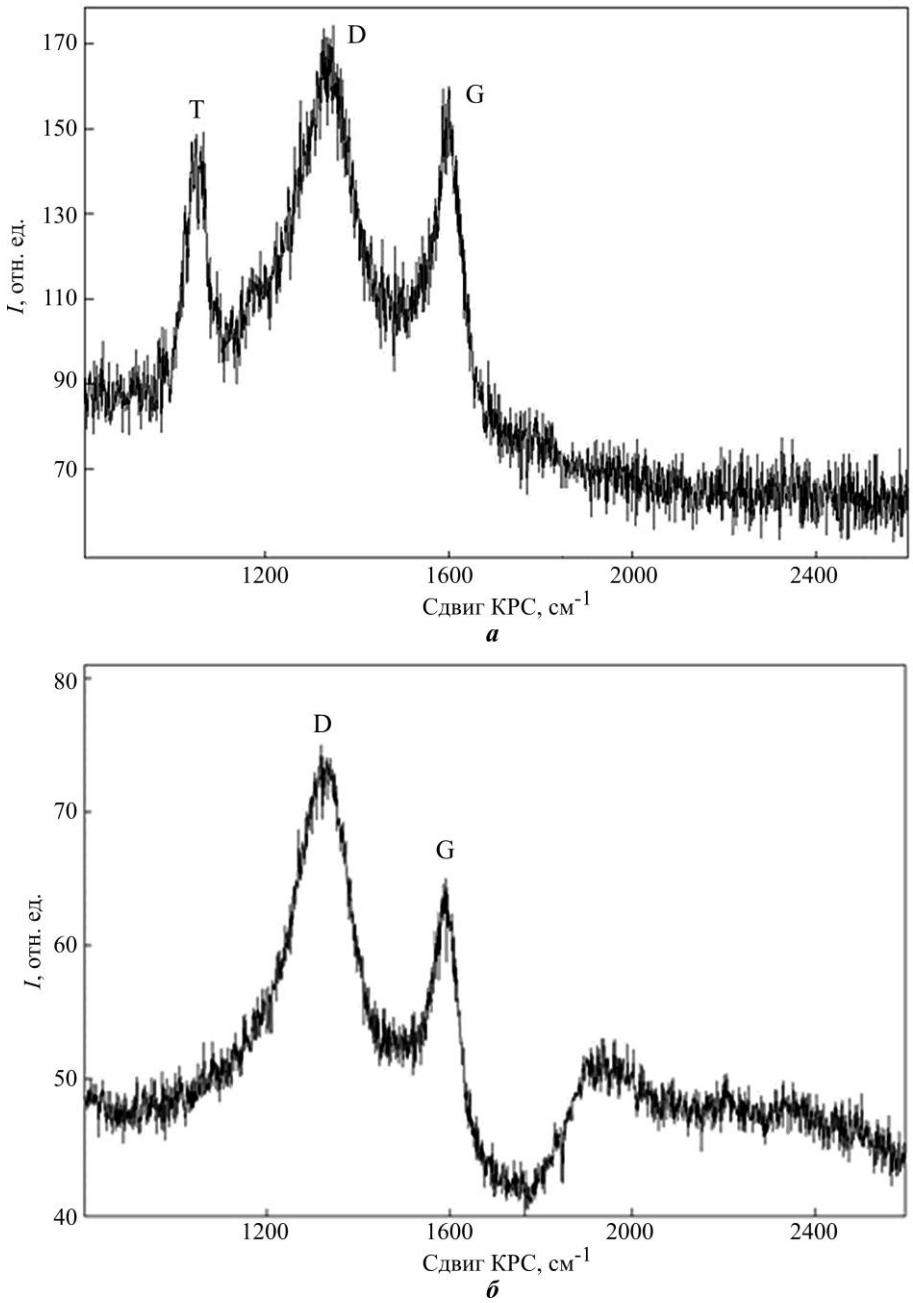


Рис. 7. КРС-спектры образца интеркалированного графита исходного (*а*) и прошедшего обработку ионами гелия (*б*)
Fig. 7. Raman spectra of the initial sample (*a*) and the intercalated graphite treated with helium ions (*b*)

Заключение. Применение в качестве автоэмиссионной среды интеркалированного графита позволяет значительно снизить стоимость холодных катодов и упростить технологию его изготовления. Химическая интеркаляции и плазменный метод дают возможность получать широкий спектр композиционных материалов – интеркалированных графитов, состоящих из углеродных наноструктур, а также обеспечивать увеличение тока эмиссии и снижать рабочее напряжение катодов, необходимых для эмиссионной электроники.

Литература

1. ***Сорокина Н. Е., Никольская И. В., Ионов С. Г., Авдеев В. В.*** Интеркалированные соединения графита акцепторного типа и новые углеродные материалы на их основе // Изв. Академии наук. Серия: химическая. 2005. № 8. С. 1699–1716. EDN: HSPOYL.

2. ***Черныш И. Г., Бурая И. Д.*** Исследование процесса окисления графита раствором бихромата калия в серной кислоте // Химия твердого топлива. 1990. № 1. С. 123–127.

3. ***Лобанов С. В., Федоров И. А., Шешин Е. П.*** Термо- и автоэмиссионные свойства наноструктурированных катодов, изготовленных на основе интеркалированного пирографита // Тр. МФТИ. 2017. Т. 9. № 4 (36). С. 39–42. EDN: YUSWIZ.

4. ***Евстигнеев С. И., Ткаченко А. А.*** Катоды и подогреватели электровакуумных приборов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1975. 195 с.

5. Разработка автоэмиссионных катодов методом прессования пирографита с тройным карбонатом / ***С. В. Лобанов, И. А. Федоров, Е. П. Шешин и др.*** // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 1. С. 45–52. https://doi.org/10.17587/nmst.19.45-52. – EDN: XRKVUD.

6. ***Соловьёва А. Е.*** Изменения структуры поликристаллического оксида иттрия при облучении ионами ксенона // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 591–597. EDN: YLMCRM.

7. Спектры рамановского рассеяния света аморфного углерода, модифицированного железом / ***С. Г. Ястребов, В. И. Иванов-Омский, В. А. Кособукин и др.*** // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 23. С. 47–53. EDN: RDBMUV.

8. ***Baker F. S., Osborn A. R., Williams J.*** Field emission from carbon fibres: A new electron source // Nature, 1972. Vol. 239. P. 96–97.

9. Свободные графеновые пленки из терморасширенного графита / ***А. Т. Дидейкин, В. В. Соколов, Д. А. Саксеев и др.*** // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 9. С. 146–149. EDN: RCTVOB.

10. Некоторые аспекты использования углеродных материалов в автоэлектронных эмиссионных катодах / ***А. Ф. Бобков, Е. В. Давыдов, С. В. Зайцев и др.*** // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 95–103.

11. ***Khamdokhov Z. M., Fedotova G. V., Samodurov P. S., Shermetova M. A.*** Cold cathodes based on an assembly of microchannel plates for low-power X-ray tubes // Instruments and Experimental Techniques. 2021. Vol. 64. No. 1. P. 117–120.

12. NIST X-ray photoelectron spectroscopy database (SRD 20), version 5.0 // National Institute of Standards and Technology [Электронный ресурс]. 2023. URL: https://dx.doi.org/10.18434/T4T88K (дата обращения: 22.04.2024).

13. ***Biesinger M. C.*** Accessing the robustness of adventitious carbon for charge referencing (correction) purposes in XPS analysis: Insights from a multi-user facility data review // Appl. Surf. Sci. 2022. Vol. 597. Art. ID: 153681. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153681

14. ***Morgan D. J.*** Comments on the XPS analysis of carbon materials // J. of Carbon Research. 2021. Vol. 7. Iss. 3. Art. No. 51. https://doi.org/10.3390/c7030051

15. Спектроскопические методы исследования продуктов эрозии первой стенки токамака (обзор) / ***Н. Ю. Свечников, В. Г. Станкевич, Б. Н. Колбасов и др.*** // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. № 4. С. 5–33. https://doi.org/10.21517/0202-3822-2022-45-4-5-33. – EDN: YWYWQI.

16. ***Ferrari A. C., Robertson J.*** Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 61. Iss. 20. P. 14095–14107. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095

17. ***Ferrari A. C.*** Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects // Solid State Commun. 2007. Vol. 143. Iss. 1-2. P. 47–57. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052

18. ***Пул Ч. П., Оуэнс Ф.*** Нанотехнологии / пер. с англ. под ред. Ю. И. Головина. 2-е изд. М.: Техносфера, 2006. 327 с.

Статья поступила в редакцию 22.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 16.05.2024 г.;
принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Хамдохов Залим Мухамедович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37а), hamdohov@mail.ru

Маргушев Заур Чамилович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37а), zmargush@yandex.ru

Калажоков Замир Хамидбиевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики наносистем Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), старший научный сотрудник отдела компьютерных рентгенооптических систем Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37а), z-kalazh@yandex.ru

Калажоков Хамидби Хажисмелович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), khh49@mail.ru

Кушхов Хасби Билялович – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической и физической химии Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), hasbikushchov@yahoo.com

Тешев Руслан Шахбанович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и цифровых информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), teshev.r@mail.ru

References

1. Sorokina N. E., Nikol'skaya I. V., Ionov S. G., Avdeev V. V. Acceptor-type graphite intercalation compounds and new carbon materials based on them. *Russ. Chem. Bull.*, 2005, vol. 54, iss. 8, pp. 1749–1767. https://doi.org/10.1007/s11172-006-0034-4

2. Chernysh I. G., Buraya I. D. Research of graphite oxidation by potassium bichromate solution in sulphuric acid. *Khimiya tverdogo topliva*, 1990, no. 1, pp. 123–127. (In Russian).

3. Lobanov S. V., Fedorov I. A., Sheshin E. P. Thermionic and field emission properties of nanostructured cathodes based on intercalated pyrolytic graphite. *Tr. MFTI = Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, 2017, vol. 9, no. 4 (36), pp. 39–42. (In Russian). EDN: YUSWIZ.

4. Evstigneyev S. I., Tkachenko A. A. *Cathodes and vacuum tube heaters.* 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1975. 195 p. (In Russian).

5. Lobanov S. V., Fedorov I. A., Sheshin E. P., Grigoryeva I. G., Antonov A. A. Development of the field emission cathodes by pressing of pyrolytic graphite with triple carbonate. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Techology*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 45–52. (In Russian). https://doi.org/10.17587/nmst.19.45-52. – EDN: XRKVUD.

6. Solovyeva A. E. Modeling of the mechanism of changing the structure of polycrystalline yttrium oxide upon irradiation with xenon ions. *Uspekhi prikladnoy fiziki = Advances in Applied Physics*, 2017, vol. 5, no. 6, pp. 591–597. (In Russian). EDN: YLMCRM.

7. Yastrebov S. G., Ivanov-Omskii V. I., Kosobukin V. A., Dumitrache F., Morosanu C. Raman spectra of iron-modified amorphous carbon. *Tech. Phys. Lett.*, 2004, vol. 30, iss. 12, pp. 995–997. https://doi.org/10.1134/1.1846838

8. Baker F. S., Osborn A. R., Williams J. Field emission from carbon fibres: A new electron source. *Nature*, 1972, vol. 239, p. 96–97.

9. Dideikin A. T., Sokolov V. V., Sakseev D. A., Baidakova M. V., Vul' A. Ya. Free graphene films obtained from thermally expanded graphite. *Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, no. 9, pp. 1378–1381. https://doi.org/10.1134/S1063784210090239

10. Bobkov A. F., Davydov E. V., Zaitsev S. V., Karpov A. V., Kazadaev M. A., Nikolaeva I. N., Popov M. O., Skorokhodov E. N., Suvorov A. L., Cheblukov Yu. N. Some aspects of the use of carbon materials in autoelectronic emission cathodes. *Journal of Technical Physics*, 2001, vol. 71, iss. 6, pp. 95–103.

11. Khamdokhov Z. M., Fedotova G. V., Samodurov P. S., Shermetova M. A. Cold cathodes based on an assembly of microchannel plates for low-power X-ray tubes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 117–120.

12. NIST X-ray photoelectron spectroscopy database (SRD 20), version 5.0. *National Institute of Standards and Technology*. 2023. Available at: https://dx.doi.org/10.18434/T4T88K (accessed: 22.04.2024).

13. Biesinger M. C. Accessing the robustness of adventitious carbon for charge referencing (correction) purposes in XPS analysis: Insights from a multi-user facility data review. *Appl. Surf. Sci.*, 2022, vol. 597, art. ID: 153681. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153681

14. Morgan D. J. Comments on the XPS analysis of carbon materials. *J. of Carbon Research*, 2021, vol. 7, iss. 3, art. no. 51. https://doi.org/10.3390/c7030051

15. Svechnikov N. Yu., Stankevich V. G., Kolbasov B. N., Lebedev A. M., Sukhanov L. P., Menshikov K. A. On the possibility of studying the erosion products of the tokamak first wall materials by spectroscopic methods (review). *VANT. Seriya: Termoyadernyy sintez = Problems of Atomic Science and Technology, Series: Thermonuclear Fusion*, 2022, vol. 45, no. 4, pp. 5–33. (In Russian). https://doi.org/10.21517/0202-3822-2022-45-4-5-33. – EDN: YWYWQI.

16. Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 61, iss. 20, pp. 14095–14107. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095

17. Ferrari A. C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Commun.*, 2007, vol. 143, iss. 1-2, pp. 47–57. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052

18. Poole Ch. P., Jr., Owens F. J. *Introduction to nanotechnology*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2003. xii, 388 p.

The article was submitted 22.03.2024; approved after reviewing 16.05.2024;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Zalim M. Khamdokhov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Institute of Informatics and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, 360000, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, I. Armand st., 37a), hamdohov@mail.ru

Zaur Ch. Margushev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Institute of Informatics and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, 360000, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, I. Armand st., 37a), zmargush@yandex.ru

Zamir Kh. Kalazhokov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Physics of Nanosystems Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), Senior Scientific Researcher of the Computer X-ray Optical Systems Department, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, 360000, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, I. Armand st., 37a), z-kalazh@yandex.ru

Khamidbi Kh. Kalazhokov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Theoretical and Experimental Physics Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), khh49@mail.ru

Khasbi B. Kushchov – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Head of the Inorganic and Physical Chemistry Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), hasbikushchov@yahoo.com

Ruslan Sh. Teshev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Electronics and Digital Information Technology Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), teshev.r@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 004.896
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-432-446
EDN: GDWVBD

Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния

***Б. В. Ширяев*[1], *Д. П. Аргунов*[1], *Ю. С. Жидик*[2], *А. Ю. Ющенко*[1], *И. В. Лаптев*[2]**

[1]*АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск, Россия*
[2]*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

shiryaev_bv@niipp.ru

Аннотация. На этапе выходного контроля оценка внешнего вида ИС позволяет отсортировать потенциально не рабочие ИС. Для повышения скорости отбраковки ИС и снижения себестоимости производства перспективной является разработка интеллектуальных автоматических систем контроля их внешнего вида. В работе предложен алгоритм автоматического контроля внешнего вида СВЧ монолитных ИС (МИС) на основе вычисления и сравнения пиксельных расстояний на соответствующих участках преобразованной микрофотографии МИС и растрированного фотошаблона. Показано, что разработанный алгоритм позволяет эффективно обнаруживать дефектные участки микрофотографий СВЧ и фотонных МИС. На основе разработанного алгоритма реализован тестовый программный продукт для осуществления процесса автоматического контроля внешнего вида СВЧ МИС в условиях производства. Тестирование разработанного алгоритма на группах микрофотографий СВЧ МИС разных топологий показало высокую скорость автоматического контроля внешнего вида СВЧ МИС при низкой расходимости с ручным контролем.

Ключевые слова: автоматизация, контроль внешнего вида, интегральные схемы, СВЧ МИС, фотошаблон, микрофотография, карта дефектности, нейронная сеть, детектирование дефектов

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-03-2020-237/1 (проект FEWM-2020-0040).

© Б. В. Ширяев, Д. П. Аргунов, Ю. С. Жидик, А. Ю. Ющенко, И. В. Лаптев, 2024

Для цитирования: Ширяев Б. В., Аргунов Д. П., Жидик Ю. С., Ющенко А. Ю., Лаптев И. В. Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 432–446. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-432-446. – EDN: GDWVBD.

Original article

Algorithm for automatic inspection of the surface of integrated circuits based on calculation of pixel distance

B. V. Shiryaev[1], D. P. Argunov[1], Yu. S. Zhidik[2], A. Yu. Yushchenko[1], I. V. Laptev[2]

[1]JSC "Scientific Research Institute of Semiconductor Devices", Tomsk, Russia
[2]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

shiryaev_bv@niipp.ru

Abstract. At the stage of output control the integrated circuits (IC) surface inspection allows the sorting out of potentially non-working ICs. The development of intelligent automatic systems for IC surface inspection is promising in order to enhance the reject rate and reduce production costs. In this work, an algorithm for automatic monolithic microwave IC (MMIC) surface inspection is proposed based on calculation and comparison of pixel distances in the corresponding sections of transformed micrograph of MMIC and rasterized photomask. It was demonstrated that the developed algorithm allows the effective detection of defective regions in micrographs of microwave and photonic MICs. Based on the developed algorithm, a test software product for automatic MMIC surface inspection in the manufacturing environment has been implemented. Testing of the developed algorithm on groups of micrographs of MMIC of different topologies showed a high speed of automatic MMIC surface inspection at a low divergence with manual inspection.

Keywords: automation, surface inspection, integrated circuits, MMIC, photomask, microphotography, defect map, neural network, defect detection

Funding: the work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the Agreement no. 075-03-2020-237/1 (project FEWM-2020-0040).

For citation: Shiryaev B. V., Argunov D. P., Zhidik Yu. S., Yushchenko A. Yu., Laptev I. V. Algorithm for automatic inspection of the surface of integrated circuits based on calculation of pixel distance. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 432–446. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-432-446. – EDN: GDWVBD.

Введение. В современном производстве полупроводниковых приборов технологический цикл включает в себя большое количество операций контроля параметров по различным признакам [1–3]. Одним из видов технологического контроля является контроль внешнего вида выпускаемой продукции [4, 5]. Наиболее важными категориями для контроля внешнего вида ИС являются: качественный анализ внешнего вида

элементов [6, 7], отсутствие повреждений и загрязнений металлизации, соответствие внешнего вида ИС рисунку фотошаблона [8, 9]. На предприятиях контроль внешнего вида ИС часто проводится вручную и, как следствие, данный этап занимает много рабочего времени оператора, что приводит к увеличению конечной стоимости выпускаемой продукции [10].

Создание программного продукта, осуществляющего по полученным в автоматическом режиме микрофотографиям ИС контроль их внешнего вида, способствует решению данной проблемы. Представленный в работе [11] алгоритм автоматического контроля внешнего вида позволяет с высокой точностью определять степень дефектности монолитных ИС (МИС) и существенно повышать производительность (при сравнении с ручным контролем). Но длительное обучение сверточных нейронных сетей, использующихся в предложенном алгоритме, не позволяет эффективно применять его в производственном процессе.

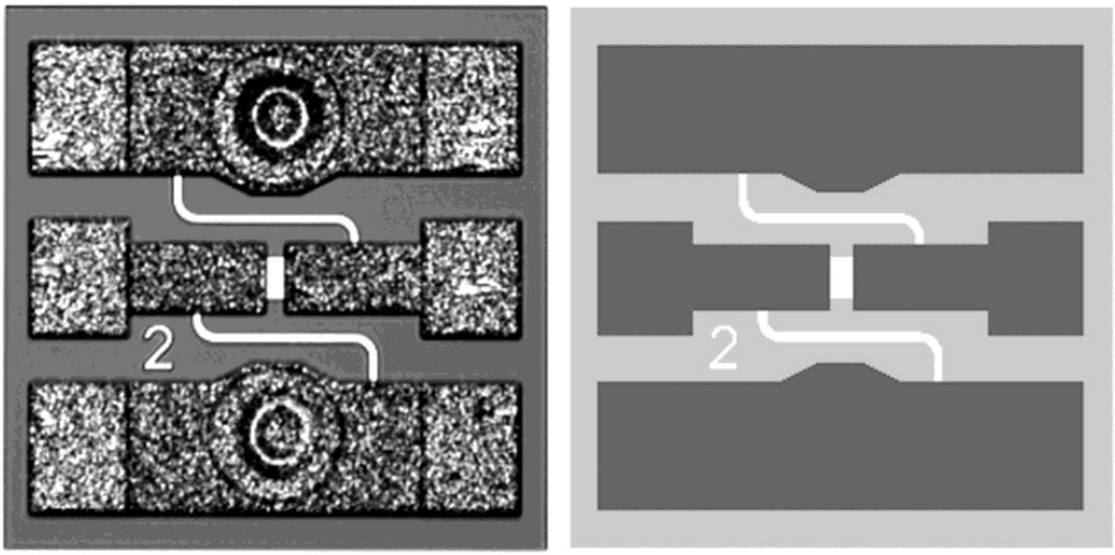
Цель настоящей работы – создание алгоритма автоматического контроля внешнего вида СВЧ МИС на основе вычисления и сравнения пиксельных расстояний на соответствующих участках преобразованной микрофотографии СВЧ МИС и растрированного фотошаблона. Предполагается, что быстродействие такого алгоритма будет намного выше без существенной потери точности детектирования дефектов по сравнению с алгоритмом, описанным в [11].

Алгоритм автоматического визуального контроля. В основу принципа работы алгоритма автоматического визуального контроля, оценивающего степень дефектности СВЧ МИС, положено качественное сравнение микрофотографии исследуемой СВЧ МИС с изображением комплекта фотошаблонов, или чертежей, задействованных при ее изготовлении. Алгоритм анализирует их различия, вызванные особенностями технологии изготовления и фотографирования: механические повреждения слоев, ошибки совмещения слоев, искажение формы элементов [12, 13], оптические ошибки, погрешности микроскопии и др.

Работа над алгоритмом автоматического контроля внешнего вида МИС с использованием метода вычисления пиксельного расстояния привела к необходимости выполнения следующих этапов: 1) поиск предварительно настроенных точек совмещения; 2) вычисление матрицы аффинного преобразования; 3) растеризация векторного чертежа с заливкой однородных областей; 4) выделение области анализа из растрированного чертежа и микрофотографии и преобразование выделенной области анализа микрофотографии МИС с использованием классификатора на основе искусственной нейронной сети; 5) вычисление карты дефектности; 6) определение наличия дефекта по карте дефектности.

На рис. 1 приведены микрофотография исследуемой СВЧ МИС и ее растрированный чертеж. Результатом обработки микрофотографии исследуемой СВЧ МИС является построенная карта дефектности, отображающая в масштабе микрофотографии дефектные участки.

Поиск предварительно настроенных точек совмещения. Перед поиском дефектов на микрофотографии исследуемой СВЧ МИС ее изображение совмещается с чертежом топологии по нескольким заранее определенным точкам. На рис. 2 показан пример совмещения микрофотографии исследуемой СВЧ МИС и топологического чертежа по двум точкам совмещения. Используемая в алгоритме структура данных о точках совмещения включает в себя информацию о положении и размере области поиска точки совмещения на микрофотографии, координату положения на топологическом чертеже и малое цветное изображение – эталон.



а ***б***

Рис. 1. Микрофотография СВЧ МИС (*а*) и ее растрированный чертеж (*б*)
Fig. 1. Microphotograph of a MMIC (*a*) and its screened drawing (*b*)

Определение координат положения точек совмещения P (x; y) реализуется поиском минимальной суммы квадратов разниц цвета пикселей между эталоном и участком микрофотографии из области поиска точки совмещения [14]:

$$K_{x,y} = \sum\left(R_{x+i,y+j} - R_{i,j}^{TC}\right)^2 + \sum\left(G_{x+i,y+j} - G_{i,j}^{TC}\right)^2 + \\ + \sum\left(B_{x+i,y+j} - B_{i,j}^{TC}\right)^2,$$

где $R_{x+i,y+j}, G_{x+i,y+j}, B_{x+i,y+j}$ – компоненты цвета в RGB-формате с диапазоном значений от 0 до 255 области поиска точки совмещения; $R_{i,j}^{TC}, G_{i,j}^{TC}, B_{i,j}^{TC}$ – компоненты цвета в RGB-формате с диапазоном значений от 0 до 255 изображения периферии точки совмещения.

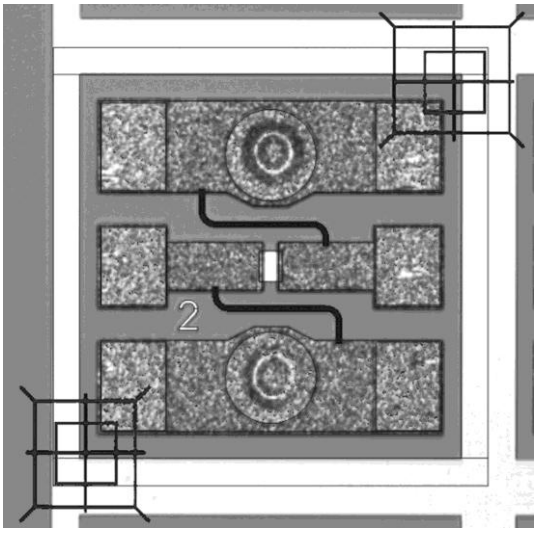


Рис. 2. Совмещение топологического чертежа и микрофотографии СВЧ МИС по двум точкам
Fig. 2. Combining a topological drawing and a microphotograph of a MMIC at two alignment points

Выбранный метод поиска точек совмещения реализован с использованием библиотеки OpenCV, так как он является одним из самых быстрых шаблонных методов поиска с использованием фурье-преобразования [15].

Вычисление матрицы аффинного преобразования. Матрица аффинного преобразования производит отображение точек векторного пространства топологического чертежа в растровое пространство микрофотографии СВЧ МИС. В общем виде данное отображение можно записать как

$$V' M = P', \qquad (1)$$

$$V' = \begin{pmatrix} v_{1x} & v_{1y} & 1 \\ v_{2x} & v_{2y} & 1 \\ n & n & n \\ v_{nx} & v_{ny} & 1 \end{pmatrix}, \quad P' = \begin{pmatrix} p_{1x} & p_{1y} & 1 \\ p_{2x} & p_{2y} & 1 \\ n & n & n \\ p_{nx} & p_{ny} & 1 \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & m_{31} & 1 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где V' – дополненная матрица координат точек совмещения в пространстве топологического чертежа; P' – дополненная матрица координат точек совмещения, соответствующих в пространстве микрофотографии исследуемой СВЧ МИС точкам матрицы V'; M – матрица аффинного преобразования.

Подстановка значений матриц в выражение (1) с последующим обобщением приводит к выражению

$$\begin{cases} p_{ix} = v_{ix} m_{11} + v_{iy} m_{21} + m_{31}, \\ p_{iy} = v_{ix} m_{12} + v_{iy} m_{22} + m_{32}. \end{cases}$$

Выражение ошибки методом наименьших квадратов [16] для данных выражений примет вид

$$F(M) = \sum_{i=1}^{n} \left(p_{ix} - (v_{ix} m_{11} + v_{iy} m_{21} + m_{31}) \right)^2 + \sum_{i=1}^{n} \left(p_{iy} - (v_{ix} m_{12} + v_{iy} m_{22} + m_{32}) \right)^2. \tag{3}$$

При дифференцировании по каждой неизвестной переменной получаются две системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} m_{11} \sum_{i=1}^{n} v_{ix}^2 + m_{21} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} v_{iy} + m_{31} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} = \sum_{i=1}^{n} p_{ix} v_{ix}, \\ m_{11} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} v_{iy} + m_{21} \sum_{i=1}^{n} v_{iy}^2 + m_{31} \sum_{i=1}^{n} v_{iy} = \sum_{i=1}^{n} p_{ix} v_{iy}, \\ m_{11} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} + m_{21} \sum_{i=1}^{n} v_{iy} + m_{31} n = \sum_{i=1}^{n} p_{ix}, \end{cases} \quad \begin{cases} m_{12} \sum_{i=1}^{n} v_{ix}^2 + m_{22} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} v_{iy} + m_{32} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} = \sum_{i=1}^{n} p_{iy} v_{ix}, \\ m_{12} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} v_{iy} + m_{22} \sum_{i=1}^{n} v_{iy}^2 + m_{32} \sum_{i=1}^{n} v_{iy} = \sum_{i=1}^{n} p_{iy} v_{iy}, \\ m_{12} \sum_{i=1}^{n} v_{ix} + m_{22} \sum_{i=1}^{n} v_{iy} + m_{32} n = \sum_{i=1}^{n} p_{iy}. \end{cases}$$

Решение позволяет найти значение элементов матрицы (2) для отображения векторного чертежа в пространство микрофотографии СВЧ МИС [17].

Выбранный метод вычисления матрицы преобразования векторного пространства топологического чертежа в растровое пространство микрофотографии позволяет учесть остаточный поворот изображения СВЧ МИС на микрофотографии [11], оценить корректность совмещения вычислением ошибки по формуле (3) и скорректировать набор точек совмещения для получения удовлетворительного результата совмещения.

Растеризация векторного чертежа с заливкой однородных областей. Для сравнения микрофотографии исследуемой МИС с изображением комплекта фотошаблонов алгоритмом используется топологический чертеж, представляющий собой цифровой файл векторного изображения формата .dxf [18, 19]. Данный файл содержит информацию о заложенных изображениях всех слоев фотошаблона. При этом для проведения визуального контроля алгоритмом используются только те слои и участки топологического чертежа, которые формируют внешний вид исследуемой СВЧ МИС. После вычисления матрицы аффинного преобразования топологического чертежа осуществляется его конвертация из векторного пространства в растровое для дальнейшего

попиксельного сравнения с микрофотографией, полученной с использованием автоматической съемки исследуемой СВЧ МИС с захватом частей соседних МИС (см. рис. 2).

Выделение области анализа и ее преобразование. Данный этап позволяет выделить из микрофотографии исследуемую СВЧ МИС или ее отдельный элемент и устранить возникающие при автоматической съемке смещения. Область анализа при этом привязана к координатам топологического чертежа. Это дает возможность переносить размер области анализа на микрофотографию СВЧ МИС с сохранением всех ее элементов. Размер и расположение области анализа определяет матрица аффинного преобразования чертежа.

Область анализа микрофотографии исследуемой СВЧ МИС преобразуется классификатором, реализованным на основе искусственной нейронной сети. Нейронная сеть является многослойным персептроном с одним скрытым слоем. Количество выходов персептрона соответствует количеству классифицируемых областей чертежа. На рис. 3 изображена архитектура используемой искусственной нейронной сети, содержащая области подложки, элементы металлизации (Au), резисторы, конденсаторы на основе Ta_2O_5. Искусственная нейронная сеть предварительно обучена относить цвет пикселя микрофотографии СВЧ МИС к цвету соответствующей области фотошаблона методом обратного распространения ошибки [20, 21].

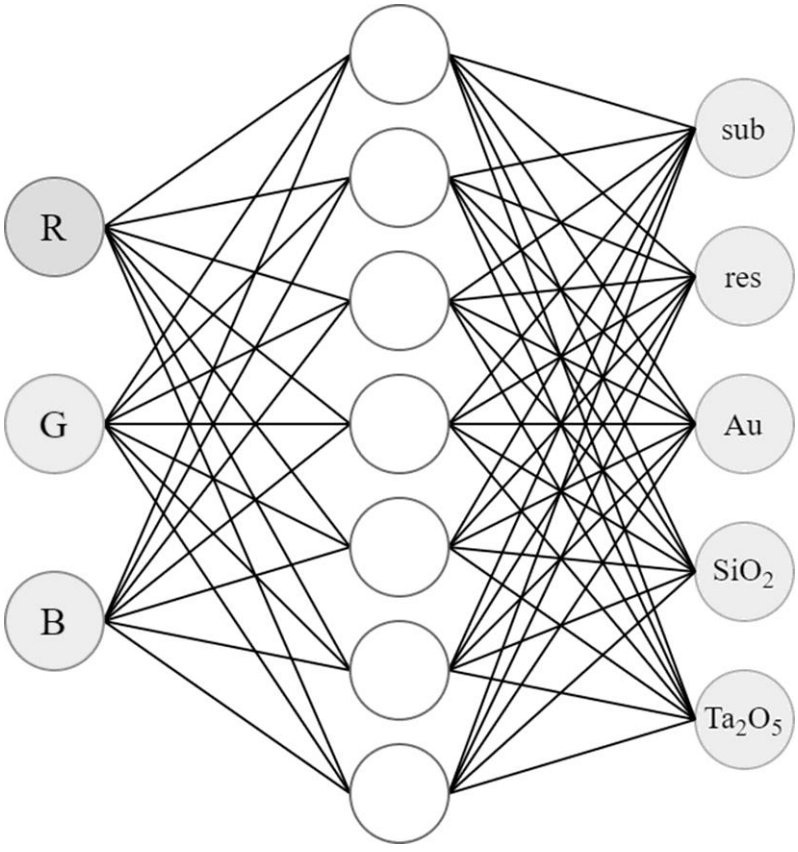
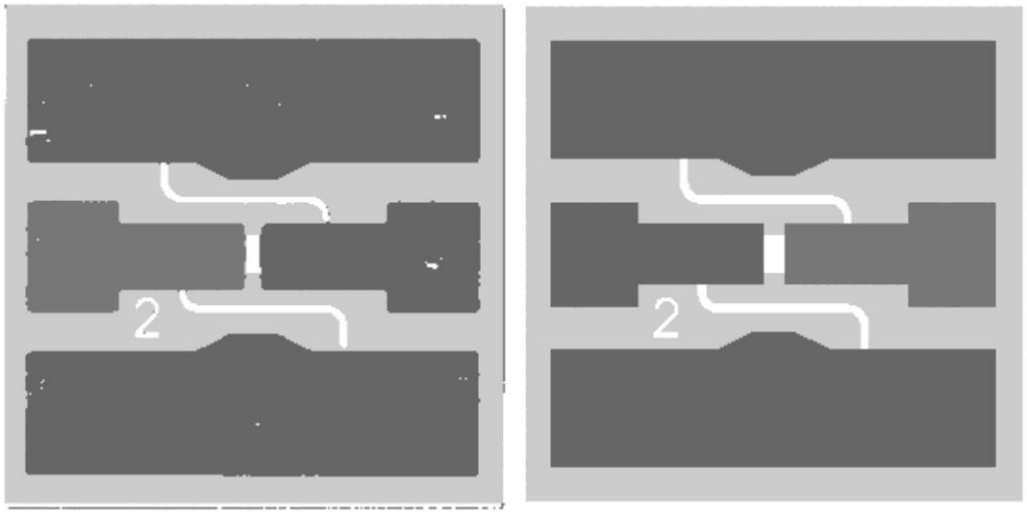


Рис. 3. Архитектура искусственной нейронной сети для классификации микрофотографии СВЧ МИС: R, G, B – компоненты цвета; sub – области подложки; res – резисторы; Au – элементы металлизации; SiO_2, Ta_2O_5 – области конденсаторов и изоляции

Fig. 3. Artificial neural network architecture for classifying a microphotograph of a MMIC: R, G, B – color components; sub – containing areas of the substrate; res – resistors; Au – metallization elements; SiO_2, Ta_2O_5 – areas of capacitors and insulation

В результате работы классификатора получается преобразованная микрофотография СВЧ МИС в палитре цветов растрированного чертежа (рис. 4).



а ***б***

Рис. 4. Преобразованная микрофотография СВЧ МИС (*а*) и растрированный чертеж (*б*)
Fig. 4. Converted microphotograph of a MMIC (*a*) and screened drawing (*b*)

Вычисление карты дефектности. Для каждого исследуемого пикселя преобразованной микрофотографии рассчитывается расстояние до ближайшего пикселя растрированного чертежа, к которому принадлежит классифицированный пиксель (рис. 5).

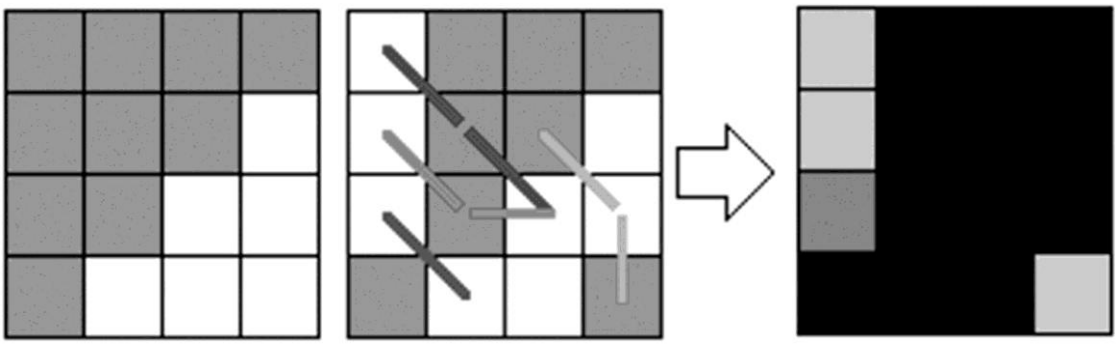


Рис. 5. Вычисление пиксельного расстояния классифицированных пикселей участка микрофотографии для одной области растрированного чертежа
Fig. 5. Calculating the pixel distance of classified pixels of a microphoto area for one area of a screened drawing

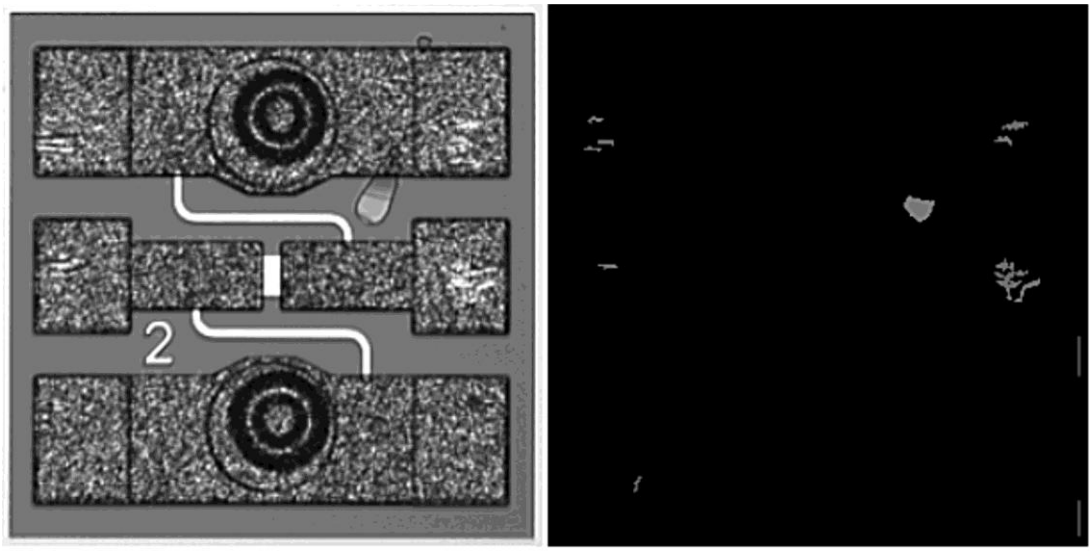
Результатом работы данного этапа алгоритма является карта дефектности, представляющая собой изображение в градациях серого. Черный цвет полученного изображения означает полное соответствие положения классифицированного пикселя микрофотографии СВЧ МИС области топологического чертежа, к которой он принадлежит. Серый цвет означает несоответствие положения классифицированного пикселя области, к которой он принадлежит: чем светлее пиксель, тем дальше расположена область принадлежности.

Определение наличия дефекта. Для получения информации о наличии дефекта в области анализа карта дефектности предварительно претерпевает бинарное преобразование [22] по заранее установленному значению – порогу детектирования дефектов.

Данный порог позволяет исключить некритичные отклонения на изображении топологии исследуемой СВЧ МИС, возникающие вследствие аберрации оптической системы при съемке микрофотографий. Таким образом порог детектирования дефектов регулирует чувствительность алгоритма.

На последнем этапе проводится поиск группы пикселей с линейным размером, превышающим предельно допустимый (при наличии хотя бы одной такой группы на микрофотографии СВЧ МИС считается бракованной).

На рис. 6 показан пример результата работы алгоритма: выделенная область анализа микрофотографии СВЧ МИС с дефектом области SiO_2 и выделенный дефект на карте дефектности.



а *б*

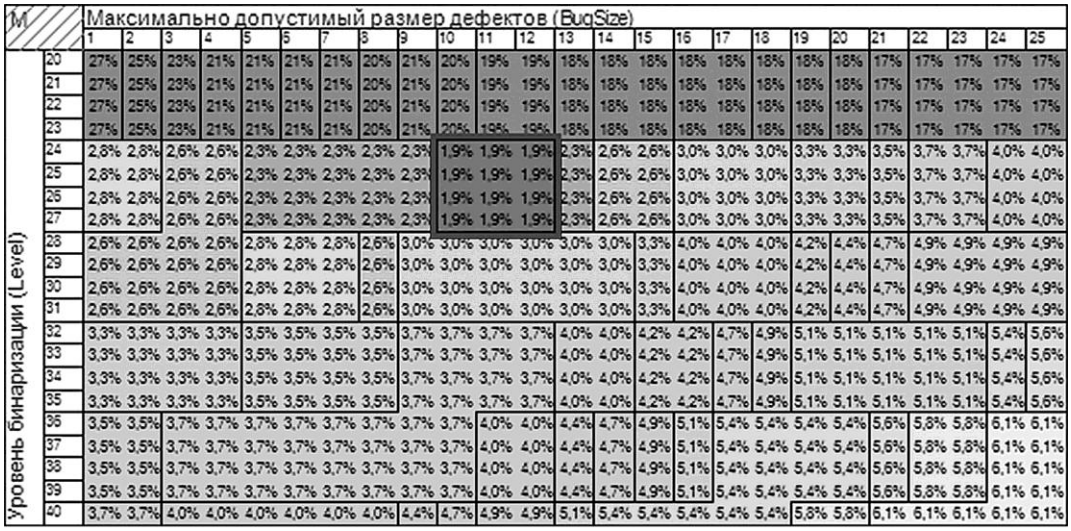
Рис. 6. Результат работы алгоритма: *а* – выделенная область анализа микрофотографии СВЧ МИС с дефектом области SiO_2; *б* – выделенный дефект на карте дефектности
Fig. 6. Result of the algorithm: *a* – a selected area of analysis of a microphotograph of a MMIC with a defect in the SiO_2 region; *b* – a selected defect on the defect map

Экспериментальное тестирование алгоритма. Работа с алгоритмом начинается с ручной настройки с использованием графического интерфейса. В процессе настройки алгоритма пользователь последовательно настраивает все этапы алгоритма, подготавливая его выполнять автоматический визуальный контроль над определенной группой микрофотографий СВЧ МИС.

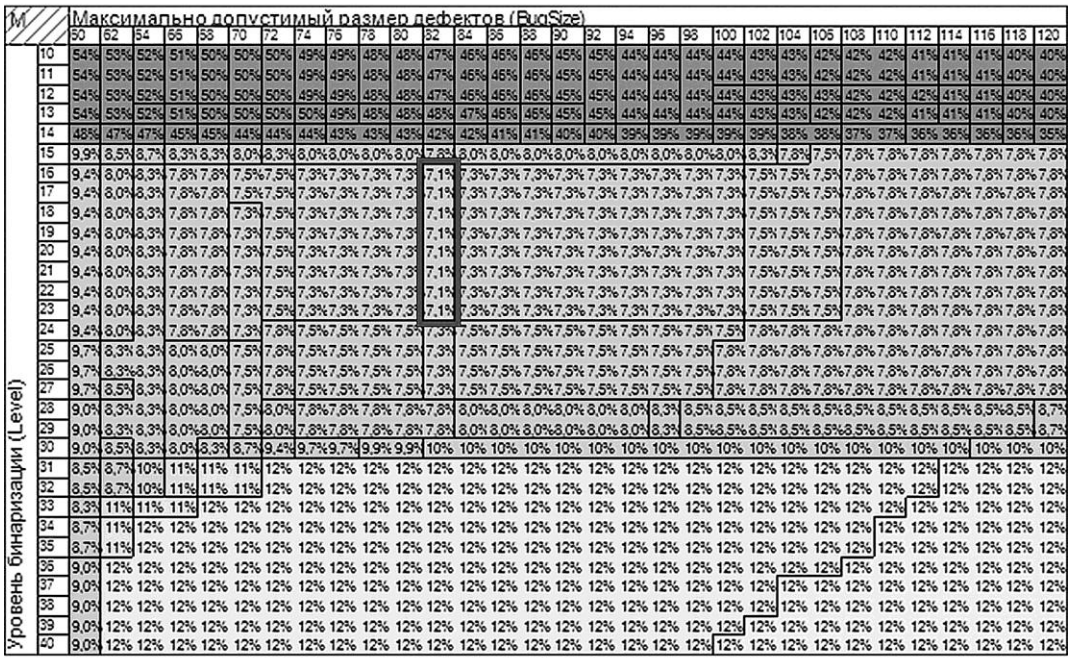
Общий процесс настройки алгоритма представляет собой выполнение следующих этапов: 1) загрузка типичной микрофотографии МИС и топологического чертежа в программу; 2) совмещение топологического чертежа и микрофотографии; 3) установка набора точек совмещения и их настройка; 4) выделение области анализа; 5) определение архитектуры искусственной нейронной сети; 6) подготовка обучающего набора искусственной нейронной сети; 7) обучение искусственной нейронной сети (обучается автоматически методом обратного распространения ошибки); 8) установка порога детектирования дефектов и минимально допустимого размера дефекта на основе данных, полученных в процессе настройки.

Для оценки качества разработанного алгоритма проведено тестирование его на группе микрофотографий простых СВЧ МИС (см. рис. 1), произведенных АО «НИИПП» (г. Томск). Для удобного сравнения алгоритма с предыдущей версией [11] при тестиро-

вании использовали тот же набор микрофотографий и эквивалентное вычислительное оборудование в следующей конфигурации: шестиядерный процессор Intel Core i5-8400, имеющий шесть вычислительных потоков с частотой 3,8 ГГц на один вычислительный поток и оперативную память объемом 16 ГБ. В результате экспериментов получены данные о степени различия полученных карт раскроя пластин при определенном установленном пороге бинарного преобразования и минимально допустимом размере дефекта (рис. 7).



а



б

Рис. 7. Данные (%) о степени различия работы алгоритма с ручным визуальным контролем: *а* – для набора микрофотографий простых МИС СВЧ-диапазона; *б* – для набора микрофотографий СВЧ МИС аттенюатора мощностью 2 дБ

Fig. 7. Data (%) on the degree of difference between the operation of the algorithm and manual visual control: *a* – for a set of microphotographs of simple MICs of the microwave range; *b* – for a set of microphotographs of a MMIC attenuator 2 dB

Для простых МИС СВЧ-диапазона (рис. 7, *а*) минимальное значение степени расхождения автоматического и ручного контроля составило менее 2 % из 428 исследуемых СВЧ МИС при пороге бинарного преобразования 24–27 и максимально допустимом дефекте 10–12 пикселей. Область с расхождением результатов автоматического контроля внешнего вида от ручного не превышает 3 % при пороге бинарного преобразования 24–31 и максимально допустимом дефекте 1–14 пикселей. Таким образом, область стабильного результата достаточно большая, чтобы получать удовлетворительный результат на других похожих наборах данных. От исходного набора из 428 СВЧ МИС определены годными 8 (1,9 %) бракованных СВЧ МИС.

Для более сложной СВЧ МИС аттенюатора мощностью 2 дБ (рис. 7, *б*) минимальное значение степени расхождения автоматического и ручного контроля составило 7,1 % при пороге бинарного преобразования 16–23 и максимально допустимом дефекте 82 пикселя. Диапазон расхождения результатов автоматического и ручного контроля дефектов СВЧ МИС аттенюатора не превышает 8 % из 428 исследуемых МИС при пороге бинарного преобразования 16–27 и максимально допустимом дефекте 66–120 пикселей.

Результаты сравнения производительности алгоритма, описанного в [11], и модифицированного алгоритма приведены в таблице.

Результаты работы различных версий алгоритма автоматического контроля внешнего вида СВЧ МИС
The results of various versions of algorithm for automatic visual inspection of MMIC

Критерий сравнения	Разработанный алгоритм [11]	Модифицированный алгоритм
Производительность		
Затраченное время на одну микрофотографию, с	2,2	1
Производительность в многопоточном режиме	428 СВЧ МИС за 480 с	428 СВЧ МИС за 150 с
Простые СВЧ МИС		
Ошибка повторения ручного визуального контроля, %	7,1	1,9
Время обучения нейронной сети (подготовка)	10 эпох по 34 мин	< 1 мин
СВЧ МИС аттенюатора мощностью 2 дБ		
Ошибка повторения ручного визуального контроля, %	11	7,1
Время обучения нейронной сети (подготовка)	10 эпох по 47 мин	< 1 мин

Скорость работы алгоритма удовлетворительная. Обработка 428 микрофотографий СВЧ МИС занимает 150–160 с на шестиядерном процессоре. Производительность на один поток составляет 2,2 с на одну микрофотографию. При сравнении разработанного модифицированного алгоритма с предыдущей версией [11] время, затрачиваемое на обработку одной микрофотографии, уменьшилось с 2,2 до 1 с, что показывает снижение требуемой производительности на один вычислительный поток в 2 раза. С учетом многозадачности компьютера производительность выросла в 3 раза: время, затраченное на обработку 428 микрофотографий, составляет 150 с вместо 480 с при работе с предыдущей версией алгоритма. Количество ошибок определения дефектности МИС СВЧ диапазона уменьшилось с 7,1 до 3 %.

С использованием модифицированного алгоритма автоматического контроля внешнего вида МИС проведен автоматический контроль внешнего вида сформированных на полупроводниковой подложке InP фотонных интегральных схем электрооптического модулятора (рис. 8) [23].

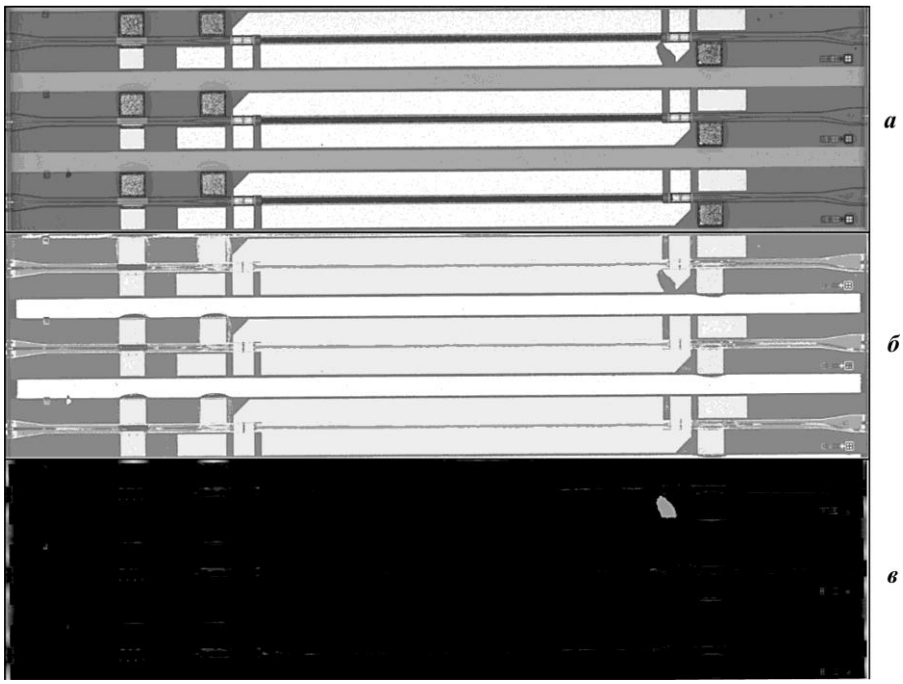


Рис. 8. Результат работы алгоритма при контроле дефектов фотонной интегральной схемы электрооптического модулятора: *а* – выделенная область анализа с дефектом области металлизации и пассивации; *б* – преобразованная микрофотография; *в* – выделенный дефект на карте дефектности

Fig. 8. Result of the algorithm when inspecting defects in a photonic integrated circuit of an electro-optical modulator: *a* – a selected analysis area with a defect in the metallization and passivation region; *b* – a converted microphotograph; *c* – a selected defect on the defect map

При проведении автоматического контроля дефектов МИС электрооптического модулятора важным этапом является настройка оптимальных параметров работы алгоритма. Исследуемая МИС электрооптического модулятора имеет большие габаритные размеры кристалла (9,0 × 0,55 мм) по сравнению с исследуемыми до этого кристаллами СВЧ МИС, но при этом содержит в своем составе элементы шириной не более 1 мкм (полупроводниковый оптический волновод).

Проведенный автоматический контроль внешнего вида МИС электрооптического модулятора с использованием разработанного алгоритма показал среднее быстродействие (около 5 с на микрофотографию), но малую ошибку повторения ручного визуального контроля (около 8 %) за счет высокого разрешения микрофотографии фотонной интегральной схемы и сложной топологии.

Заключение. Разработанный алгоритм автоматического контроля внешнего вида позволяет обнаруживать дефектные участки на микрофотографиях СВЧ и фотонных МИС в процессе их пиксельного сравнения с растрированным топологическим чертежом. Алгоритм использует в качестве классификатора пикселей на принадлежность их к определенному участку чертежа искусственную нейронную сеть. Разработанный программный продукт позволяет повысить скорость анализа до 3 раз по сравнению с раз-

работанным ранее алгоритмом при использовании эквивалентного вычислительного оборудования. Совпадение результатов алгоритма автоматического контроля с ручным контролем внешнего вида СВЧ МИС составляет до 97 %. На основе предложенного алгоритма автоматического контроля внешнего вида СВЧ МИС разработан тестовый программный продукт, который в настоящий момент тестируется в АО «НИИПП».

Литература

1. Классификатор изображений микросхем при помощи сверточной нейронной сети / ***С. А. Сарманбетов, А. А. Максутова, Д. М. Жексебай и др.*** // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. 2021. № 6. С. 59–65. https://doi.org/10.32014/2021.2518-1726.102

2. ***Lee K. B., Cheon S., Kim C. O.*** A convolutional neural network for fault classification and diagnosis in semiconductor manufacturing processes // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2017. Vol. 30. Iss. 2. P. 135–142. https://doi.org/10.1109/TSM.2017.2676245

3. ***Huang S.-H., Pan Y.-C.*** Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey // Computers in Industry. 2015. Vol. 66. P. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.10.006

4. ***Machado Trindade B., Ukwatta E., Spence M., Pawlowicz C.*** Segmentation of integrated circuit layouts from scan electron microscopy images // 2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE). Quebec: IEEE, 2018. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/CCECE.2018.8447878

5. ***Schlosser T., Beuth F., Friedrich M., Kowerko D.*** A novel visual fault detection and classification system for semiconductor manufacturing using stacked hybrid convolutional neural networks // 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Zaragoza: IEEE, 2019. P. 1511–1514. https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869311

6. ***Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А.*** Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. М.: Техносфера, 2016. 328 с.

7. ***Xie L., Huang R., Gu N., Cao Z.*** A novel defect detection and identification method in optical inspection // Neural Comput. and Applic. 2014. Vol. 24. Iss. 7–8. P. 1953–1962. https://doi.org/10.1007/s00521-013-1442-7

8. ***Simonyan K., Zisserman A.*** Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // ArXiv.org [Электронный ресурс]. 2014. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556 (дата обращения: 15.05.2024).

9. ***Мишанов Р. О.*** Визуальный контроль КМОП-микросхем // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. (Самара, 16–18 мая 2017). Самара: Офорт, 2017. С. 201–203. EDN: YNCCNX.

10. ***Федотов А. Ю., Ральникова А. С., Вахрушев А. В.*** Контроль дефектов морфологии и топологии микро- и наносхем // Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии (КРИС-2019): тез. VIII Междунар. конф. (Ижевск, 11–12 апр. 2019). Ижевск: УдмФИЦ УрО РАН, 2019. С. 90–92. EDN: GNWITY.

11. ***Ширяев Б. В., Ющенко А. Ю., Безрук А. В.*** Алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем с использованием искусственных нейронных сетей // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22. № 2. С. 72–76. https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-2-72-76. – EDN: SIKIRC.

12. ***Nakazawa T., Kulkarni D. V.*** Wafer map defect pattern classification and image retrieval using convolutional neural network // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2018. Vol. 31. No. 2. P. 309–314. https://doi.org/10.1109/TSM.2018.2795466

13. ***Cheon S., Lee H., Kim C. O., Lee S. H.*** Convolutional neural network for wafer surface defect classification and the detection of unknown defect class // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2019. Vol. 32. No. 2. P. 163–170. https://doi.org/10.1109/TSM.2019.2902657

14. ***Forsyth D. A., Ponce J.*** Computer vision: A modern approach. London: Pearson Education, 2015. 792 p.

15. ***Suzuki S., Abe K.*** Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Comput. Gr. Image Process. 1985. Vol. 30. Iss. 1. P. 32–46. https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7

16. ***Suykens J. A. K., De Brabanter J., Lukas L., Vandewalle J.*** Weighted least squares support vector machines: Robustness and sparse approximation // Neurocomputing. 2002. Vol. 48. Iss. 1–4. P. 85–105. https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00644-0

17. ***Ширяев Б. В., Аргунов Д. П., Безрук А. В.*** Алгоритм совмещения векторного чертежа фотошаблона и микрофотографии СВЧ МИС с помощью метода наименьших квадратов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2020. № 1-2. С. 41–43. EDN: INVHDR.

18. ***Abouel Nasr E. S., Kamrani A. K.*** A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system // Comput. Ind. Eng. 2006. Vol. 51. Iss. 3. P. 389–415. https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.08.004

19. ***Ahmad N., Anwarul Haque A. F. M.*** Manufacturing feature recognition of parts using DXF files // 4th International Conference on Mechanical Engineering (ICME 2001). Dhaka: BUET, 2001. Vol. 3 (VII). P. 111–115.

20. ***Schmidhuber J.*** Deep learning in neural networks: An overview // Neural Netw. 2015. Vol. 61. P. 85–117. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003

21. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting / ***N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky et al.*** // Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15 (56). P. 1929–1958.

22. ***Shiryaev B., Bezruk A., Argunov D., Yushchenko A.*** Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks // ITM Web Conf. 2019. Vol. 30. Art. No. 04012. https://doi.org/10.1051/itmconf/20193004012

23. Technological development of an InP-based Mach–Zehnder modulator / ***S. Ishutkin, V. Arykov, I. Yunusov et al.*** // Symmetry. 2020. Vol. 12. Iss. 12. Art. No. 2015. https://doi.org/10.3390/sym12122015

Статья поступила в редакцию 10.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 12.10.2023 г.;
принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Ширяев Борис Владимирович – кандидат технических наук, инженер-программист АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99А), shiryaev_bv@niipp.ru

Аргунов Дмитрий Пантелеевич – инженер-программист АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99А), argunov_dp@niipp.ru

Жидик Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории интегральной оптики и радиофотоники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40), zhidikyur@mail.ru

Ющенко Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, начальник отдела АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99А), yay@niipp.ru

Лаптев Илья Вадимович – младший научный сотрудник лаборатории интегральной оптики и радиофотоники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40), ilya.laptev997@mail.ru

References

1. Sarmanbetov S. A., Maksutova A. A., Zheksebay D. M., Kozhagulov E. T., Bazhaev N. A. Classifier of microcircuit images using a conventional neural network. *Izvestiya NAN RK. Seriya fiziko-matematicheskaya = Reports of NAS RK. Physico-Mathematical Series,* 2021, no. 6, pp. 59–65. (In Russian). https://doi.org/10.32014/2021.2518-1726.102

2. Lee K. B., Cheon S., Kim C. O. A convolutional neural network for fault classification and diagnosis in semiconductor manufacturing processes. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2017, vol. 30, iss. 2, pp. 135–142. https://doi.org/10.1109/TSM.2017.2676245

3. Huang S.-H., Pan Y.-C. Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey. *Computers in Industry*, 2015, vol. 66, pp. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.10.006

4. Machado Trindade B., Ukwatta E., Spence M., Pawlowicz C. Segmentation of integrated circuit layouts from scan electron microscopy images. *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE).* Quebec, IEEE, 2018, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/CCECE.2018.8447878

5. Schlosser T., Beuth F., Friedrich M., Kowerko D. A novel visual fault detection and classification system for semiconductor manufacturing using stacked hybrid convolutional neural networks. *2019 24th IEEE Interna-*

tional Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Zaragoza, IEEE, 2019, pp. 1511–1514. https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869311

6. Gruzdov V. V., Kolkovskiy Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *Control of new technologies in solid-state microwave electronics*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016. 328 p. (In Russian).

7. Xie L., Huang R., Gu N., Cao Z. A novel defect detection and identification method in optical inspection. *Neural Comput. and Applic.*, 2014, vol. 24, iss. 7–8, pp. 1953–1962. https://doi.org/10.1007/s00521-013-1442-7

8. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *ArXiv.org.* 2014. Available at: https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556 (accessed: 15.05.2024).

9. Mishanov R. O. Visual inspection of CMOS chips. *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, proceedings of the Russia-Wide res.-to-pract. conf. (Samara, May 16–18, 2017). Samara, Ofort Publ., 2017, pp. 201–203. (In Russian). EDN: YNCCNX.

10. Fedotov A. Yu., Ral'nikova A. S., Vakhrushev A. V. Control of defects in morphology and topology of micro- and nanocircuits. *Kristallizatsiya: komp'yuternye modeli, eksperiment, tekhnologii = Solidification: Computer Simulation, Experiments and Technology (KRIS-2019)*, 8th International conf. abstracts (Izhevsk, Apr. 11–12, 2019). Izhevsk, UdmFITs UrO RAN Publ., 2019, pp. 90–92. (In Russian). EDN: GNWITY.

11. Shiryaev B. V., Yushchenko A. Yu., Bezruk A. V. Algorithm for automated visual inspection of monolithic integrated circuits using neural networks. *Doklady TUSUR = Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 72–76. (In Russian). https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-2-72-76. – EDN: SIKIRC.

12. Nakazawa T., Kulkarni D. V. Wafer map defect pattern classification and image retrieval using convolutional neural network. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018, vol. 31, no. 2, pp. 309–314. https://doi.org/10.1109/TSM.2018.2795466

13. Cheon S., Lee H., Kim C. O., Lee S. H. Convolutional neural network for wafer surface defect classification and the detection of unknown defect class. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 163–170. https://doi.org/10.1109/TSM.2019.2902657

14. Forsyth D. A., Ponce J. *Computer vision: A modern approach.* London, Pearson Education, 2015. 792 p.

15. Suzuki S., Abe K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Comput. Gr. Image Process.*, 1985, vol. 30, iss. 1, pp. 32–46. https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7

16. Suykens J. A. K., De Brabanter J., Lukas L., Vandewalle J. Weighted least squares support vector machines: Robustness and sparse approximation. *Neurocomputing*, 2002, vol. 48, iss. 1–4, pp. 85–105. https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00644-0

17. Shiryaev B. V., Argunov D. P., Bezruk A. V. Algorithm for combining a vector drawing of a photomask and a microphotograph of a MMIC using the least squares method. *Sbornik izbrannykh statey nauchnoy sessii TUSUR = TUSUR Scientific Session: Collection of Selected Papers*, 2020, no. 1-2, pp. 41–43. (In Russian). EDN: INVHDR.

18. Abouel Nasr E. S., Kamrani A. K. A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system. *Comput. Ind. Eng.*, 2006, vol. 51, iss. 3, pp. 389–415. https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.08.004

19. Ahmad N., Anwarul Haque A. F. M. Manufacturing feature recognition of parts using DXF files. *4th International Conference on Mechanical Engineering (ICME 2001).* Dhaka, BUET, 2001, vol. 3 (VII), pp. 111–115.

20. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Netw.*, 2015, vol. 61, pp. 85–117. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003

21. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15 (56), pp. 1929–1958.

22. Shiryaev B., Bezruk A., Argunov D., Yushchenko A. Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks. *ITM Web Conf.*, 2019, vol. 30, art. no. 04012. https://doi.org/10.1051/itmconf/20193004012

23. Ishutkin S., Arykov V., Yunusov I., Stepanenko M., Troyan P., Zhidik Yu. Technological development of an InP-based Mach–Zehnder modulator. *Symmetry*, 2020, vol. 12, iss. 12, art. no. 2015. https://doi.org//10.3390/sym12122015

The article was submitted 10.10.2023; approved after reviewing 12.10.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Boris V. Shiryaev – Cand. Sci. (Eng.), Software Engineer, JSC "Scientific Research Institute of Semiconductor Devices" (Russia, 634034, Tomsk, Krasnoarmeyskaya st., 99A), shiryaev_bv@niipp.ru

Dmitry P. Argunov – Software Engineer, JSC "Scientific Research Institute of Semiconductor Devices" (Russia, 634034, Tomsk, Krasnoarmeyskaya st., 99A), argunov_dp@niipp.ru

Yuri S. Zhidik – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Integrated Optics and Microwave Photonics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Russia, 634050, Tomsk, Lenin ave., 40), zhidikyur@mail.ru

Alexey Yu. Yushchenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, JSC "Scientific Research Institute of Semiconductor Devices" (Russia, 634034, Tomsk, Krasnoarmeyskaya st., 99A), yay@niipp.ru

Ilya V. Laptev – Junior Scientific Researcher of the Laboratory of Integrated Optics and Microwave Photonics, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics (Russia, 634050, Tomsk, Lenin ave., 40), ilya.laptev997@mail.ru

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS

Vol. 52, *No.* 7, 2023. – ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи
журнала «Известия вузов. Электроника».

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

Научная статья
УДК 538.975: 621.383.52
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-447-455
EDN: BCJDOR

Лазерное формирование подвешенных графеновых каналов фоточувствительных детекторов

Н. П. Некрасов, Д. Т. Мурашко, П. Н. Василевский, А. Ю. Герасименко, В. К. Неволин, И. И. Бобринецкий

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

n.p.nekrasov@yandex.ru

Аннотация. Формирование используемых в качестве фотодетекторов подвешенных каналов оксида графена фемтосекундным излучением позволяет выполнять операции модификации чувствительного канала с высокой точностью, не повреждая пленку. Однако создание графеновых каналов является задачей, требующей новых нестандартных решений. В работе рассмотрен фотовольтаический эффект в подвешенном канале оксида графена. Показано, что свободностоящие пленки оксида графена, сформированные фемтосекундным излучением, позволяют избежать воздействия зарядов на подложке на проводящий подвешенный графеновый канал. Экспериментально исследовано управление формированием восстановленного канала из оксида графена. Выяснено, что структура представляет собой нанесенный осаждением из раствора пленочный слой оксида графена на подложке из полидиметилсилоксана с отверстием под подвешенную часть пленки. Проведены исследования полученных образцов методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния. Установлено, что в данных микроструктурах можно формировать заданный уровень фотоотклика в зависимости от степени восстановления структуры. Фоточувствительность в структурах с подвешенным оксидом графена определена переходами восстановленной и невосстановленной областей канала и составляет 0,8 А/Вт для длины волны 630 нм. Устройство показало высокую фоточувствительность в видимом ближнем ИК-диапазоне.

Ключевые слова: фоточувствительные элементы, двумерные материалы, графен, управление проводимостью, двумерный канал

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-19-00401-П), https://rscf.ru/project/19-19-00401/

Для цитирования: Лазерное формирование подвешенных графеновых каналов фоточувствительных детекторов / Н. П. Некрасов, Д. Т. Мурашко, П. Н. Василевский и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 447–455. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-447-455. – EDN: BCJDOR.

© Н. П. Некрасов, Д. Т. Мурашко, П. Н. Василевский, А. Ю. Герасименко, В. К. Неволин, И. И. Бобринецкий, 2024

Original article

Laser formation of suspended graphene channels for photosensitive detectors

N. P. Nekrasov, D. T. Murashko, P. N. Vasilevsky, A. Yu. Gerasimenko, V. K. Nevolin, I. I. Bobrinetskiy

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

n.p.nekrasov@yandex.ru

Abstract. Formation of free-standing graphene oxide films used as photodetectors by femtosecond irradiation allows modifying sensitive channel with high precision, without damaging the film. However, graphene channel formation is a task that requires new non-standard solutions. In this work, photovoltaic effect in a free-standing graphene oxide film is considered. It was demonstrated that free-standing graphene oxide films formed by femtosecond irradiation make it possible to avoid the effect of charges on substrate on conductive graphene channel. The control of the formation of a reduced graphene oxide channel was experimentally studied. It was found that the structure is a film layer of graphene oxide deposited from solution on a polydimethylsiloxane substrate with a hole for the free-standing part of the film. The obtained samples were studied using scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. It has been established that in these microstructures it is possible to form a given level of photoresponse, depending on the structure restoration degree. Photosensitivity in structures with free-standing graphene oxide is determined by the transitions of the reduced and unreduced regions of the channel and is 0.8 A/W for a wavelength of 630 nm. The device has shown high photosensitivity in the near visible infrared region.

Keywords: photosensitive elements, two-dimensional materials, graphene, conductivity control, two-dimensional channel

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant no. 19-19-00401-P), https://rscf.ru/project/19-19-00401/

For citation: Nekrasov N. P., Murashko D. T., Vasilevsky P. N., Gerasimenko A. Yu., Nevolin V. K., Bobrinetskiy I. I. Laser formation of suspended graphene channels for photosensitive detectors. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 447–455. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-447-455. – EDN: BCJDOR.

Введение. Устройства на основе восстановленного оксида графена или его модификаций обладают уникальными свойствами, имеют большую площадь, характеризуются простотой изготовления и низкой стоимостью. Такие устройства применяются в «зеленой» энергетике, биомедицине для создания биосенсоров, в технологии хранения энергии [1, 2]. Исследования оптоэлектронных устройств с применением инженерии поверхности и структуры показали улучшение поглощения света и увеличение времени жизни носителей заряда. Это способствовало появлению фотодетекторов с повышенными чувствительностью и временем отклика [3]. Однако следует отметить, что чешуйки оксида графена, содержащие кислородные функциональные группы и дефекты, ограничивают применение данных устройств в качестве фоточувствительных элементов из-за малого времени жизни сгенерированного заряда.

Электрические свойства пленки оксида графена можно существенно улучшить, создав проводящие каналы для носителей. Оптические характеристики пленки оксида графена меняются в результате преобразования энергии света в энергию фононов в момент поглощения света. Технология изменения морфологии поверхности позволяет модулировать световой отклик, что улучшает характеристики фотодетектора. При контролируемом проценте дефектов в пленке оксида графена достигается значительное улучшение таких параметров фотодетекторов, как чувствительность и обнаруживающая способность. Оксид графена с различными уровнями восстановления в широком диапазоне параметров облучения получают фемтосекундной лазерной обработкой [4] путем изготовления подвешенного канала.

В настоящей работе предлагается новый метод формирования подвешенных восстановленных фоточувствительных каналов оксида графена с использованием двухфотонной абляции и метода восстановления пленки оксида графена.

Эксперимент. Подвешенный канал оксида графена формировали модифицированным методом штамповки [5, 6] с использованием подложки (рис. 1). При проведении эксперимента учитывали гидрофобную и гидрофильную природу оксида графена.

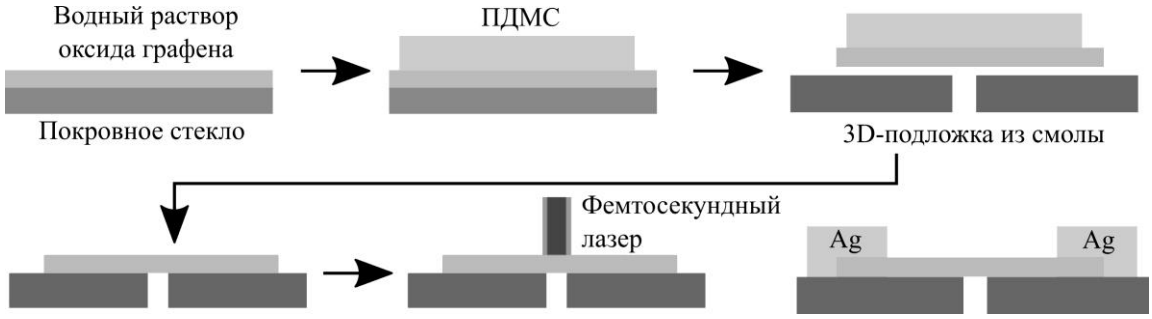


Рис. 1. Схема формирования подвешенной пленки оксида графена и контактов к ней
Fig. 1. Formation scheme of a free-standing graphene oxide film and contacts to it

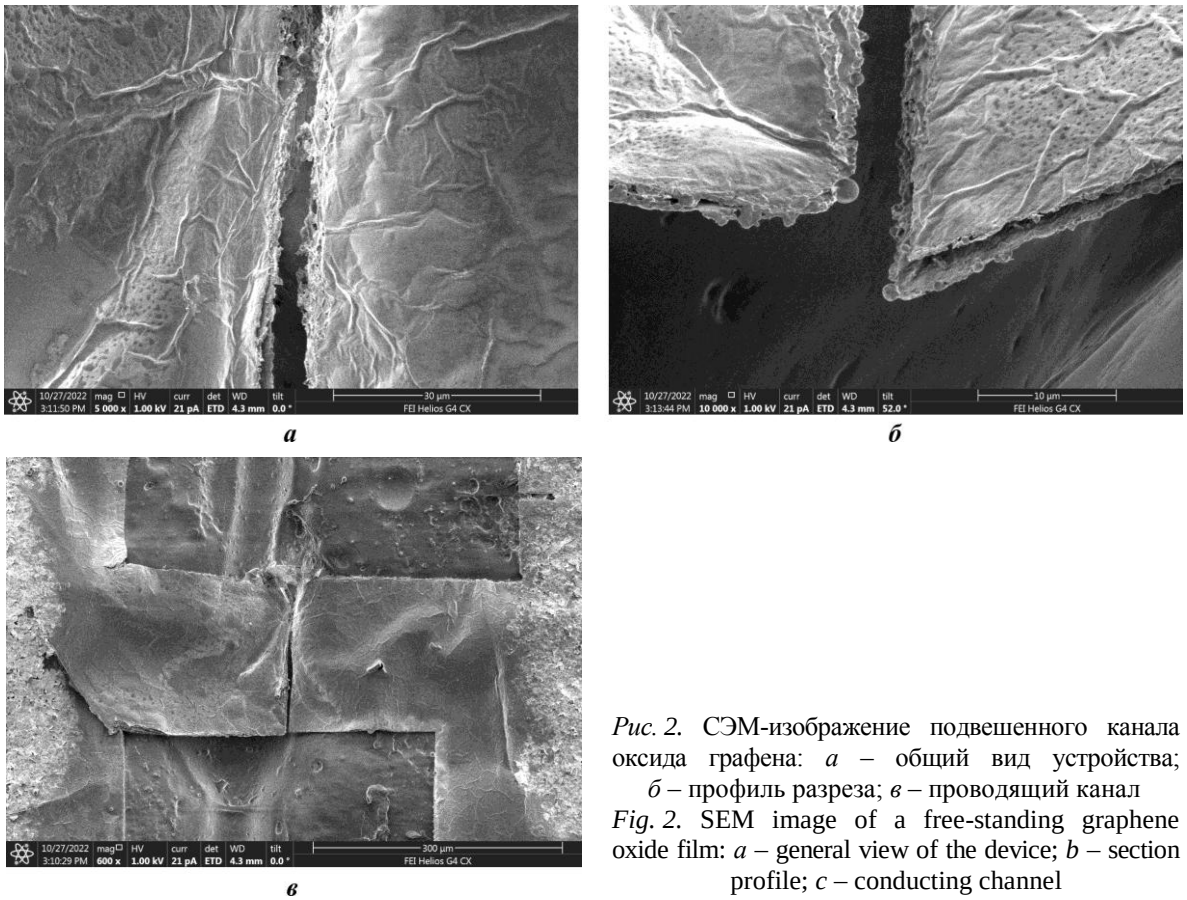
Каплю (50 мкл) водного раствора оксида графена (4 мг/мл) наносили на покровное стекло площадью около 2 × 2 см. Каплю сушили 1 ч при температуре 110–120 °C. Для удаления пленки оксида графена со стекла каплю воды (100 мкл) помещали на поверхность пленки. Затем сверху пленки с помощью металлического пресса помещали полидиметилсилоксан (ПДМС). После того как вода высохла при температуре 70–80 °C, ПДМС медленно удалили с находящейся на нем пленкой. Далее стопку ПДМС / оксида графена помещали в каплю 2-пропанола на подложку из смолы, напечатанную на 3D-принтере, с рисунком на ней, чтобы пленка стала подвешенной. Для того чтобы ПДМС мог отделить пленку, стопку нагревали до температуры 60–70 °C.

Существуют разные методы безмасочной модификации углеродных наноматериалов [7]. Лазерная обработка – наиболее доступный способ. Фемтосекундная лазерная обработка является известным безмасочным методом паттернирования наноустройств [8, 9]. В рассматриваемом случае параметры лазерной обработки скорректированы так, чтобы они были неразрушающими, но играли роль модификации поверхности. Варьировали мощность импульса, перекрытие пучка и скорость сканирования, что в совокупности определило общую дозу воздействия на площадь поверхности. Двухфотонную модификацию проводили на перестраиваемом фемтосекундном лазере Ti:Sapphire Chameleon (Coherent, г. Санта-Клара, Калифорния, США) с длиной волны 715 нм, длительностью импульса 140 фс, частотой повторения 80 МГц и варьируемой мощностью

до 30 мВт. Для настройки мощности лазерного излучения использовали моторизованный оптический аттенюатор ОАГП-М на основе призмы Глана (ООО «Авеста», г. Москва, Россия). Диаметр пучка на уровне $1/e^2$ составлял (1,2 ± 0,1) мм. Образцы помещали на моторизованный сканирующий столик XY 8MTF (Standa, г. Вильнюс, Литва). Лазерные импульсы достигали поверхности образца через оптический прямой микроскоп с объективом 60× (NA = 0,65). Накопленную энергию для двухфотонной модификации при средней мощности импульса варьировали в зависимости от скорости сканирования. Для модификации оксида графена без разрушения использовали следующие параметры: мощность 3 мВт (что соответствует 0,5 фДж), скорость прохода лазера 500 мкм/с с периодом прохода между линиями 10 мкм.

Лазерная обработка пленки оксида графена вызывает изменения морфологических, оптических и электрических свойств. Выбирали схему обработки пленки оксида графена таким образом, чтобы она стала периодической электрически и морфологически. Образовавшиеся каналы микронной ширины и, в частности, их края играют существенную роль в фотоотклике. Гетероконтакт восстановленной и невосстановленной области вносит основной вклад в фотоотклик [10].

Для получения изображений сформированной пленки оксида графена использовали сканирующий электронный микроскоп FEI Helios G4 (FEI Ltd., г. Хиллсборо, США). Ускоряющее напряжение электронной колонны составляло 1 кВт, ток электронного зонда равен 21 пА, давление в вакуумной камере $3{,}9 \cdot 10^{-4}$. Согласно изображению, полученному с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (рис. 2), толщина пленки равна 2-3 слоям пленки оксида графена.



а *б* *в*

Рис. 2. СЭМ-изображение подвешенного канала оксида графена: *а* – общий вид устройства; *б* – профиль разреза; *в* – проводящий канал

Fig. 2. SEM image of a free-standing graphene oxide film: *a* – general view of the device; *b* – section profile; *c* – conducting channel

Оптические характеристики сформированных структур исследовали на микроспектроанализаторе Centaur HR (ООО «Нано Скан Технология», г. Долгопрудный, Россия) с 100х объективом (NA = 0,9) при длине волны 532 нм и мощности 0,5 мВт (лазер Cobolt, Solna, Швеция) с размером сфокусированного пятна ~ 1 мкм^2. Измерения электрических и фоточувствительных характеристик проводили на анализаторе характеристик полупроводниковых приборов ИППП 1/5 (МНИПИ, г. Минск, Беларусь). Использовали самодельную установку с анализируемыми полупроводниками и светодиодами мощностью 30 мВт/см^2 для измерения фотоотклика на длинах волн 390, 532, 630 и 850 нм. Светодиоды включали и выключали и удерживали в каждом из режимов в течение 120 с. Параллельно с этим фиксировали кривую ВАХ.

Результаты и их обсуждение. Немодифицированная пленка оксида графена не показала значительного фотоотклика в УФ- и ближнем ИК-диапазонах без ее модификации или декорирования наночастицами [11]. После обработки сверхбыстрым лазером пленка оксида графена становится более проводящей и, что важно, имеет неоднородную по проводимости область. При этом край канала играет роль ловушек и под воздействием света захваченные состояния становятся активными в транспорте электронов. Поскольку пленка имеет неоднородную поверхность, фокус лазера перемещается вверх или вниз, что приводит к исчезновению эффекта восстановления.

На рис. 3 приведены ВАХ подвешенных графеновых каналов. Фотоотклики наблюдаются при воздействии светодиодами с длиной волны от 390 до 850 нм и мощностью 30 мВт. На малых длинах волн (390 и 532 нм) отмечается отрицательный фотоотклик. Наибольший фотоотклик наблюдается при длине волны 630 нм. Ввиду геометрии устройства эффективность фотоотклика канала снижается из-за большого количества генерируемого заряда, транспортируемого к электроду. Например, при длине волны 630 нм минимальная входная мощность составляет 5 мВт. Измерение фотоотклика во вре-

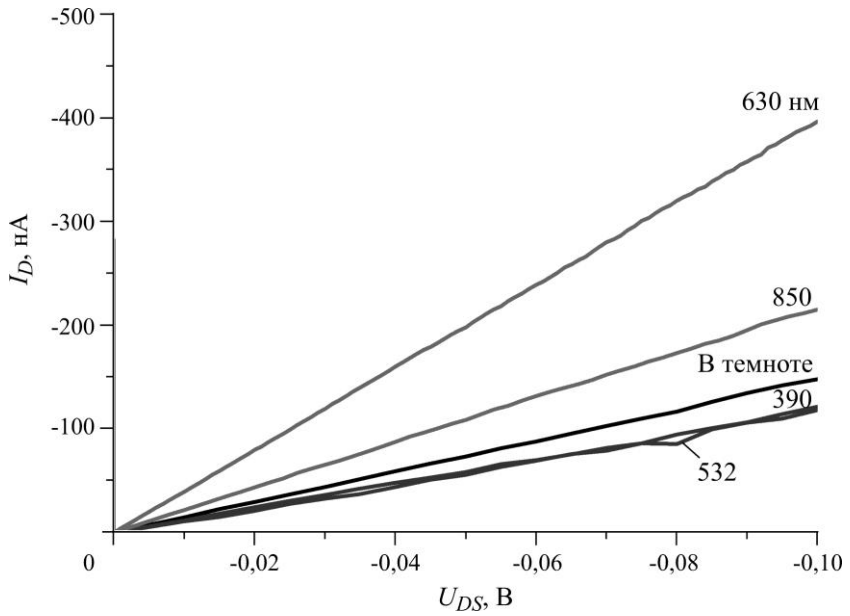


Рис. 3. ВАХ подвешенных каналов пленки оксида графена при воздействии света с разной длиной волны и мощностью 30 мВт
Fig. 3. Current-voltage characteristics of suspended channels of graphene oxide film under the light exposure of different wavelengths with a power of 30 mW

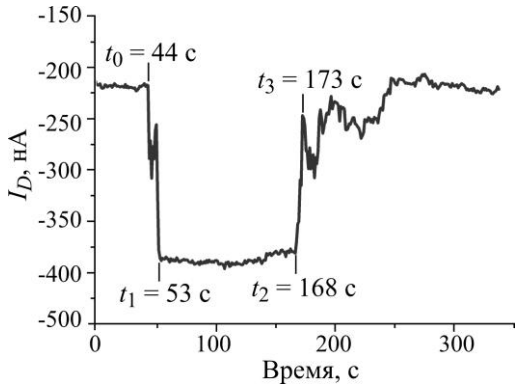


Рис. 4. Зависимость фотоотклика от времени при воздействии света с длиной волны 630 нм и мощностью 30 мВт
Fig. 4. Dependence of the photo response on time when exposed to light with a wavelength of 630 nm and a power of 30 mW

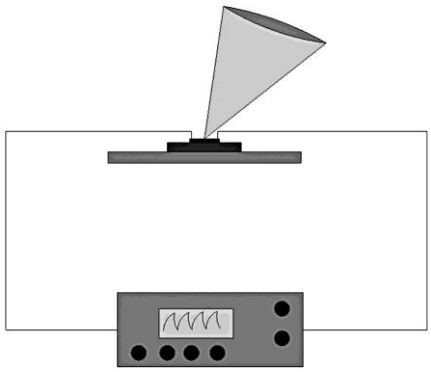


Рис. 5. Схема установки измерения фотоотклика
Fig. 5. Photoresponse measurement setup scheme

мени показало время отклика не более 10 с (рис. 4). Ток пленки не стабилен из-за теплового шума и взаимодействия чешуек между слоями. Схема измерения фотоотклика приведена на рис. 5.

Для получения более полного представления о свойствах микроканала оксида графена измеряли чувствительность R фотодетекторов:

$$R = (I_{light} - I_{dark})/P_{eff},$$

где I_{light} и I_{dark} – ток при освещении и темноте соответственно; P_{eff} – эффективная мощность лазера в области перехода.

Чувствительность фотодетектора составила ~ 0,8 А/Вт, что является достаточно хорошим показателем среди детекторов на основе подвешенных графеновых каналов [12]. Наличие нелинейного фотоотклика для различных длин волн (в том числе изменение его знака) свидетельствует о том, что фемтосекундная лазерная модификация оксида графена управляет энергетическими уровнями, сформированными в области контакта оксид графена / восстановленный оксид графена.

Измерены температурно-зависимые ВАХ одного из устройств в диапазоне температур от комнатной до 26–50 °С. Тепловой эффект (болометрический) не соответствует отклику, так как измеренный температурный коэффициент сопротивления составляет 0,8203 ГОм/°С. Это означает, что ток уменьшается с повышением температуры. Это контрастирует с тем, что наблюдалось при освещении в ближнем ИК-диапазоне. Любой тепловой эффект в данном исследовании фотоотклика исключается.

Заключение. Проведенные эксперименты позволили разработать метод создания подвешенных графеновых каналов фоточувствительных детекторов. Обработка полученной пленки фемтосекундным лазером дает возможность сформировать модифицированную чувствительную область фотодетектора. Наибольший фотоотклик (~ 0,8 А/Вт) не связан с болометрическим, а вызван только возбуждением носителей заряда в канале. Устройство показывает высокую фоточувствительность в видимом ближнем ИК-диапазоне.

Литература

1. Laser-reduced graphene: Synthesis, properties, and applications / ***Z. Wan, E. W. Streed, M. Lobino et al.*** // Adv. Mater. Technol. 2018. Vol. 3. Iss. 4. Art. ID: 1700315. https://doi.org/10.1002/admt.201700315

2. Laser fabrication of graphene-based flexible electronics / ***R. You, Y.-Q. Liu, Y.-L. Hao et al.*** // Adv. Mater. 2020. Vol. 32. Iss. 15. Art. ID: 1901981. https://doi.org/10.1002/adma.201901981

3. Free-standing graphene oxide mid-infrared polarizers / ***X. Zheng, B. Xu, S. Li et al.*** // Nanoscale. 2020. Vol. 12. Iss. 21. P. 11480–11488. https://doi.org/10.1039/D0NR01619E

4. Laser direct 3D patterning and reduction of graphene oxide film on polymer substrate / ***I. I. Bobrinetskiy, A. V. Emelianov, S. A. Smagulova et al.*** // Mater. Lett. 2017. Vol. 187. P. 20–23. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.10.073

5. A novel method for transferring graphene onto PDMS / ***W. Hiranyawasit, K. Punpattanakul, A. Pimpin et al.*** // Appl. Surf. Sci. 2015. Vol. 358 (A). P. 70–74. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.218

6. PDMS-supported graphene transfer using intermediary polymer layers / ***S. Vaziri, A. D. Smith, G. Lupina et al.*** // 2014 44th European Solid State Device Research Conference (ESSDERC). Venice: IEEE, 2014. P. 309–312. https://doi.org/10.1109/ESSDERC.2014.6948822

7. Electron-beam writing of deoxygenated micro-patterns on graphene oxide film / ***K.-H. Wu, H.-H. Cheng, A. A. Mohammad et al.*** // Carbon. 2015. Vol. 95. P. 738–745. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.116

8. Thermoelectrically driven photocurrent generation in femtosecond laser patterned graphene junctions / ***A. V. Emelianov, D. Kireev, A. Offenhäusser et al.*** // ACS Photonics. 2018. Vol. 5. Iss. 8. P. 3107–3115. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.8b00350

9. Individual SWCNT transistor with photosensitive planar junction induced by two-photon oxidation / ***A. V. Emelianov, N. P. Nekrasov, M. V. Moskotin et al.*** // Adv. Electron. Mater. 2021. Vol. 7. Iss. 3. Art. ID: 2000872. https://doi.org/10.1002/aelm.202000872

10. Large bandgap reduced graphene oxide (rGO) based n–p^+ heterojunction photodetector with improved NIR performance / ***M. Singh, G. Kumar, N. Prakash et al.*** // Semicond. Sci. Technol. 2018. Vol. 33. No. 4. Art. No. 045012. https://doi.org/10.1088/1361-6641/aab2d9

11. ***Chandrakalavathi T., Peta K. R., Jeyalakshmi R.*** Enhanced UV photoresponse with Au nanoparticles incorporated rGO/Si heterostructure // Mater. Res. Express. 2018. Vol. 5. No. 2. Art. No. 025011. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaa9ac

12. Photodetector-based material from a highly sensitive free-standing graphene oxide/polypyrrole nanocomposite / ***A. Ben Gouider Trabelsi, A. M. Elsayed, F. H. Alkallas et al.*** // Coatings. 2023. Vol. 13. Iss. 7. Art. No. 1198. https://doi.org/10.3390/coatings13071198

Статья поступила в редакцию 11.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.10.2023 г.; принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Некрасов Никита Петрович – инженер научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), n.p.nekrasov@yandex.ru

Мурашко Денис Тарасович – инженер научно-исследовательской лаборатории «Биомедицинские нанотехнологии» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), skorden@outlook.com

Василевский Павел Николаевич – инженер научно-исследовательской лаборатории «Биомедицинские нанотехнологии» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pavelvasilevs@yandex.ru

Герасименко Александр Юрьевич – доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории «Биомедицинские нанотехнологии» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gerasimenko@bms.zone

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

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

References

1. Wan Z., Streed E. W., Lobino M., Wang S., Sang R. T., Cole I. S., Thiel D. V., Li Q. Laser-reduced graphene: Synthesis, properties, and applications. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, vol. 3, iss. 4, art. ID: 1700315. https://doi.org/10.1002/admt.201700315

2. You R., Liu Y.-Q., Hao Y.-L., Han D.-D., Zhang Y.-L., You Z. Laser fabrication of graphene-based flexible electronics. *Adv. Mater.*, 2020, vol. 32, iss. 15, art. ID: 1901981. https://doi.org/10.1002/adma.201901981

3. Zheng X., Xu B., Li S., Lin H., Qiu L., Li D., Jia B. Free-standing graphene oxide mid-infrared polarizers. *Nanoscale*, 2020, vol. 12, iss. 21, pp. 11480–11488. https://doi.org/10.1039/D0NR01619E

4. Bobrinetskiy I. I., Emelianov A. V., Smagulova S. A., Komarov I. A., Otero N., Romero P. M. Laser direct 3D patterning and reduction of graphene oxide film on polymer substrate. *Mater. Lett.*, 2017, vol. 187, pp. 20–23. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.10.073

5. Hiranyawasit W., Punpattanakul K., Pimpin A., Kim H., Jeon S., Srituravanich W. A novel method for transferring graphene onto PDMS. *Appl. Surf. Sci.*, 2015, vol. 358 (A), pp. 70–74. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.218

6. Vaziri S., Smith A. D., Lupina G., Lemme M. C., Östling M. PDMS-supported graphene transfer using intermediary polymer layers. *2014 44th European Solid State Device Research Conference (ESSDERC).* Venice, IEEE, 2014, pp. 309–312. https://doi.org/10.1109/ESSDERC.2014.6948822

7. Wu K.-H., Cheng H.-H., Mohammad A. A., Blakey I., Jack K., Gentle I. R., Wang D.-W. Electron-beam writing of deoxygenated micro-patterns on graphene oxide film. *Carbon*, 2015, vol. 95, pp. 738–745. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.116

8. Emelianov A. V., Kireev D., Offenhäusser A., Otero N., Romero P. M., Bobrinetskiy I. I. Thermoelectrically driven photocurrent generation in femtosecond laser patterned graphene junctions. *ACS Photonics*, 2018, vol. 5, iss. 8, pp. 3107–3115. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.8b00350

9. Emelianov A. V., Nekrasov N. P., Moskotin M. V., Fedorov G. E., Otero N., Romero P. M., Nevolin V. K., Afinogenov B. I., Nasibulin A. G., Bobrinetskiy I. I. Individual SWCNT transistor with photosensitive planar junction induced by two-photon oxidation. *Adv. Electron. Mater.*, 2021, vol. 7, iss. 3, art. ID: 2000872. https://doi.org/10.1002/aelm.202000872

10. Singh M., Kumar G., Prakash N., Khanna S. P., Pal P., Singh S. P. Large bandgap reduced graphene oxide (rGO) based n–p^+ heterojunction photodetector with improved NIR performance. *Semicond. Sci. Technol.*, 2018, vol. 33, no. 4, art. No. 045012. https://doi.org/10.1088/1361-6641/aab2d9

11. Chandrakalavathi T., Peta K. R., Jeyalakshmi R. Enhanced UV photoresponse with Au nanoparticles incorporated rGO/Si heterostructure. *Mater. Res. Express*, 2018, vol. 5, no. 2, art. no. 025011. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaa9ac

12. Ben Gouider Trabelsi A., Elsayed A. M., Alkallas F. H., AlFaify S., Shkir M., Alrebdi T. A., Almugren Kh. S., Kusmatsev F. V., Rabia M. Photodetector-based material from a highly sensitive free-standing graphene oxide/polypyrrole nanocomposite. *Coatings*, 2023, vol. 13, iss. 7, art. no. 1198. https://doi.org/10.3390/coatings13071198

The article was submitted 11.10.2023; approved after reviewing 23.10.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

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

Denis T. Murashko – Engineer of the Research Laboratory "Biomedical Nanotechnologies", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), skorden@outlook.com

Pavel N. Vasilevsky – Engineer of the Research Laboratory "Biomedical Nanotechnologies", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pavelvasilevs@yandex.ru

Alexander Yu. Gerasimenko – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Research Laboratory "Biomedical Nanotechnologies", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gerasimenko@bms.zone

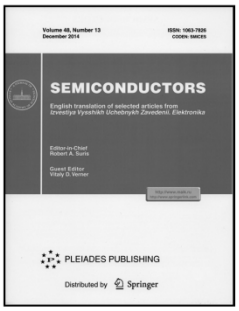
Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Head of the Scientific and Educational Center "Probe Microscopy and Nanotechnology", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vkn@miee.ru

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

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал

SEMICONDUCTORS



Vol. 57, *No.* 1, 2023. – ISSN PRINT: 1063-7826, ISSN ONLINE: 1090-6479,

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

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

Научная статья
УДК 504.064.2.001.18: 502.5
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-456-465
EDN: CPRINS

Применение интегральных показателей при оценке уровня экологической безопасности наукоемкой природно-технической геосистемы

Н. Р. Харламов, А. С. Рябышенков, В. И. Каракеян

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

kolya.kharlamov2017@yandex.ru

Аннотация. Интенсивные темпы развития производств микроэлектроники способствуют увеличению техногенных нагрузок на компоненты наукоемкой природно-технической геосистемы, что актуализирует проблему обеспечения ее экологической безопасности. В работе представлены результаты экспериментально-аналитической оценки текущего состояния экологической безопасности и прогнозирования ее возможного уровня при расширении производств микроэлектроники г. Зеленограда на основе интегрального критерия, отражающего экологическую сбалансированность между техногенным воздействием и природно-ресурсным потенциалом. В качестве предельно допустимой техногенной нагрузки, переносимой наукоемкой природно-технической системой на протяжении длительного времени без нарушения своих основных свойств, использовано понятие экологической техноемкости территории. Определены составляющие техногенной нагрузки, воздействующие на компоненты наукоемкой природно-технической геосистемы, и предложен способ уточнения их влияния на уровень экологической безопасности. Установлено, что основным дестабилизирующим фактором экологической сбалансированности являются выбросы в атмосферу, значительный источник которых – производства микроэлектроники. Показано, что интегральный коэффициент экологической опасности в настоящее время находится на критическом уровне с тенденцией к крайне опасному при росте техногенной нагрузки на атмосферу наукоемкой природно-технической геосистемы. Предложенный критерий экологической безопасности может стать инструментом повышения оперативности управления состоянием геосистемы и минимизации рисков экстремальных ситуаций.

Ключевые слова: экологическая емкость территории, экологическая техноемкость, экологическая безопасность, техногенная нагрузка, степень напряженности, наукоемкая природно-техническая геосистема

Для цитирования: Харламов Н. Р., Рябышенков А. С., Каракеян В. И. Применение интегральных показателей при оценке уровня экологической безопасности наукоемкой природно-технической геосистемы // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 456–465. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-456-465. – EDN: CPRINS.

© Н. Р. Харламов, А. С. Рябышенков, В. И. Каракеян, 2024

Original article

Application of integrated indices in making an assessment of high-tech natural-engineering geosystem environmental safety level

N. R. Kharlamov, A. S. Riabyshenkov, V. I. Karakeyan

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

kolya.kharlamov2017@yandex.ru

Abstract. Intensive rates of microelectronics production development contribute to an increase in environmental pressure on the components of a high-tech natural-engineering geosystem, which topicalizes the issue of ensuring its environmental safety. In this work, the results of experimental and analytical assessment of current status of environmental safety and of its possible level forecasting in view of microelectronics production expansion in Zelenograd city are presented, obtained based on an integral criterion that characterizes the ecological balance between man-made environmental impact and natural resource potential. The concept of ecological technological capacity of the territory is used as a maximum permissible technogenic load tolerated by high-tech natural-engineering system over extended periods without environmental disturbance. The constituents of environmental pressure affecting the components of high-tech natural-engineering geosystem are identified and a way to clarify their effect on environmental safety level is proposed. It has been established that the key factor destabilizing environment equation are atmospheric emissions the significant source of which is the microelectronics production. It was demonstrated that integrated coefficient of environmental hazard is currently at critical level with a trend towards extremely dangerous in view of growth of environmental pressure on the atmosphere of high-tech natural-engineering geosystem. The proposed environmental safety criterion can become a tool for improving the efficiency of managing the state of the geosystem and minimizing the risks of extreme situations.

Keywords: carrying capacity of territory, ecological technological capacity, environmental safety, environmental pressure, degree of tension, high-tech natural-engineering geosystem

For citation: Kharlamov N. R., Riabyshenkov A. S., Karakeyan V. I. Application of integrated indices in making an assessment of high-tech natural-engineering geosystem environmental safety level. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 456–465. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-456-465. – EDN: CPRINS.

Введение. Стратегией развития электронной промышленности России на период до 2030 г. предусматривается значительный рост производства изделий микроэлектроники на основе минимальных топологических размеров, современных технологических процессов и материалов, что требует как коренной модернизации действующих предприятий, так и строительства новых. Интенсификация отрасли неизбежно приведет к дополнительным техногенным нагрузкам на компоненты наукоемкой природно-технической геосистемы (НПТГ), возможным изменениям в зонировании территории

г. Зеленограда и существенной реорганизации системы экологического мониторинга. В этих обстоятельствах изучение текущего и будущего экологического качества базовых свойств геосистемы на соответствие нормативам безопасности приобретает особую актуальность. В качестве критерия такого соответствия используется экологическая емкость территории, определяемая как мера максимальной техногенной нагрузки [1–3]. Экологическая емкость территории может служить исходной информативной базой для диагностики и прогнозирования качества компонентов НПТГ, а также экологическим ограничением при определении перспективных параметров социально-экономического развития территории.

На сегодняшний день количественные параметры экологической емкости территории для использования в сфере природоохранной деятельности еще не выработаны, что объясняется сложностью взаимодействия различных факторов с компонентами геосистемы и степенью неопределенности влияния техногенеза на природную среду. Это обстоятельство привело к разработке методических подходов к оценке экологической емкости территории с целью поиска возможностей перехода от критических нагрузок на основные компоненты природной среды к допустимым величинам и применения некоторого ограниченного числа интегральных показателей безопасности в качестве основы для получения обобщенной оценки состояния НПТГ [4–6].

В настоящей работе приводятся результаты оценки текущего состояния экологической безопасности НПТГ при расширении производств микроэлетроники г. Зеленограда.

Интегральные критерии и показатели экологической безопасности НПТГ. Интегральные критерии характеризуют экологическую сбалансированность между природно-ресурсным потенциалом и техногенным воздействием как основу безопасности НПТГ [7–9]. Ключевое понятие при таком подходе – экологическая техноемкость территории, являющаяся частью полной экологической емкости. Под последней понимается предельно допустимая техногенная нагрузка, переносимая НПТГ на протяжении длительного времени без нарушения своих основных свойств. Тогда степень экологической напряженности территории $K_э$ равна:

$$K_э = U_э / T_э, \tag{1}$$

где $U_э$ – общая экологическая техногенная нагрузка на территорию, т/год; $T_э$ – экологическая техноемкость территории, т/год.

При анализе экологической обстановки на основе предложенного показателя общая техногенная нагрузка $U_э$ складывается из нагрузок на ее основные компоненты – атмосферу $U_а$, гидросферу $U_г$ и литосферу $U_л$:

$$U_э = U_а + U_г + U_л. \tag{2}$$

Считается, что при соблюдении условия $U_э \le T_э$ НПТГ ассимилирует все загрязнения без снижения устойчивости. В работах [7, 8] принимается, что при $K_э < 0{,}3$ экологическая обстановка соответствует нормативам безопасности, при $0{,}3 \le K_э \le 1$ – обстановка напряженная, при $1 \le K_э \le 10$ – обстановка критическая, при $K_э \ge 10$ – обстановка крайне опасная.

Источниками информации для применения формул (1) и (2) могут служить официальные базы данных Росприроднадзора о выбросах, сбросах и отходах предприятий, а также натурные измерения и аналитические вычисления по известным или оригинальным методикам [10]. Текущий показатель степени экологической напряженности НПТГ

рассчитывается на основании сопоставления общих техногенных нагрузок и экологических техноемкостей для каждого компонента природной среды по пяти муниципальным округам (МО) $K_{э\,i}^{МО}$, включающим в себя как производственные объекты, так и природные и селитебные зоны.

Техногенная нагрузка на атмосферу $U_а$ представляет собой сумму валовых выбросов загрязняющих веществ производств микроэлектроники $U_{мэ}$, выбросов других стационарных источников $U_{ст}$ (районные тепловые станции, фармацевтические и пищевые производства и др.) и валовых выбросов автотранспорта $U_{ат}$ [11]:

$$U_а = U_{мэ} + U_{ст} + U_{ат} = \sum_{i=1}^{5} U_{мэ\,i} + \sum_{i=1}^{5} U_{ст\,i} + \sum_{i=1}^{5} U_{ат\,i}\,, \qquad (3)$$

где $\sum_{i=1}^{5} U_{мэ\,i} + \sum_{i=1}^{5} U_{ст\,i} + \sum_{i=1}^{5} U_{ат\,i}$ – техногенные нагрузки от различных источников по пяти МО, т/год (табл. 1).

Таблица 1

Техногенная нагрузка по МО за 2022 г.

Table 1

Technogenic load by municipal districts for 2022

МО	$U_{мэ}$, т/год	$U_{ст}$, т/год	$U_{ат}$, т/год
«Старое Крюково»	1862,965	0,782	1107,480
«Матушкино»	76,904	75 533	1157,443
«Савёлки»	1,579	80,903	2837,415
«Крюково»	–	157,049	3217,437
«Силино»	4,790	209,9	1250,573
Итого	1946,238	524,21	8462,868

Данные таблицы указывают на существенное различие в нагрузках атмосферы МО, что объясняется неравномерным распределением объектов экономики, природных и селитебных зон в пределах исследуемой территории. Отметим также, что в настоящее время во всей техногенной нагрузке на атмосферу на долю микроэлектроники приходится порядка 18 %.

Оценка уровня экологической безопасности НПТГ. Подставляя данные табл. 1 в формулу (3), получаем текущее значение техногенной нагрузки на атмосферу от всех источников $U_а$ = 10 933,313 т/год.

Техногенная нагрузка от сброса сточных вод по официальной базе данных Росприроднадзора по государственному учету объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, составляет $U_г$ = 69,25 т/год. Анализ ситуации по обращению с отходами производства и потребления в НПТГ показывает практическое отсутствие контакта опасных и вредных примесей с почвой, что позволяет исключить из дальнейших расчетов техногенную нагрузку $U_л$ [12–14]. Таким образом, общая техногенная нагрузка на НПТГ в настоящее время составляет $U_э$ = 11 002,563 т/год.

Экологическая техноемкость исследуемой территории $T_э$ (т/год), как преобразованная техногенезом часть ее общей экологической емкости может быть представлена суммой экологических емкостей ее компонентов:

$$T_э = \sum_{i=1}^{2} E_i X_i ,$$

где E_i – оценка экологической емкости i-й среды, т/год; X_i – коэффициент вариации для естественных колебаний содержания основной субстанции в среде (для атмосферы $X_а = 3\cdot10^{-6}$, для гидросферы $X_г = (4\pm0{,}2)\cdot10^{-5}$).

Экологическая емкость атмосферы $E_а$ определяется исходя из объема воспроизводства кислорода V_{O_2} (т/год) биогеоценозом территории:

$$E_а = V_{O_2} F_а,$$

$$V_{O_2} = \sum_{i=1}^{n} S_i^{бгц} Y_i ,$$

где $F_а$ – скорость кратного обновления объема или массы среды; $S_i^{бгц}$ – площадь i-го биогеоценоза на территории, км^2; Y_i – ежегодное производство кислорода i-м биогеоценозом, т/км^2 [8].

Скорость $F_а$ определяется формулой

$$F_а = 55\,896\frac{v}{\sqrt{S}},$$

где v – среднегодовая скорость ветра, м/с; S – площадь территории, км^2.

Экологическая емкость гидросферы рассчитывается по формуле

$$E_г = V_г C_г F_г ,$$

где $V_г$ – полный среднегодовой объем всех поверхностных водоемов и водотоков территории, км^3; $C_г = 10^9$ т/км^3 – содержание основных компонентов среды (кислорода и углекислого газа в гидросфере) [7]; $F_г = (0{,}0315f + 3\cdot10^{-6}WS)V_г$ – скорость кратного обновления объема или массы среды, год$^{-1}$; f – сумма расходов воды в водотоках при приходе на территорию, м^3/с; W – среднее годовое количество осадков, мм.

Экологическая техноемкость гидросферы установлена с использованием данных по среднему годовому количеству осадков на территории г. Москвы с учетом площади водосборного бассейна реки Сходни, равной 259 км^2, и среднего расхода воды Q = 1,8 м^3/с [15]. Принимается, что сумма расходов воды f в водотоках при приходе на территорию НПТГ равна среднему расходу воды Q реки Сходни за годовой промежуток времени T = 31,536·10^6 с. Полный среднегодовой объем всех поверхностных водоемов и водотоков территории составляет: $V_г = QT = 1{,}8\cdot31{,}536\cdot10^6 = 0{,}0568$ км^3. Скорость кратного обновления гидросферы $F_г$ = 1,11 год$^{-1}$. Экологическая емкость гидросферы $E_г$ = 63 048 000 т/год. Экологическая техноемкость гидросферы НПТГ $T_э$ = 2648,016 т/год.

Для оценки уровня экологической безопасности компонентов НПТГ вычислим интегральный показатель экологической устойчивости $K_{эi}$ посредством средневзвешенных уровней экологической напряженности МО:

$$K_{эi} = \sum_{i=1}^{5} K_{эi}^{МО} a_i \,, \qquad (4)$$

где $K_{эi}^{МО}$ – показатель степени напряженности экологической обстановки пяти МО для i-го компонента природной среды; a_i – показатель значимости i-го показателя.

Показатели значимости вклада МО в общий экологический ущерб атмосфере $a_а$ и гидросфере $a_г$ НПТГ определяются на основе матричного метода парных сравнений значений показателя $K_{эi}^{МО}$. Результаты расчета степени напряженности экологической обстановки для атмосферы $K_{э.а}^{МО}$ и гидросферы $K_{э.г}^{МО}$ по МО представлены в табл. 2. Для повышения точности расчета $K_{э.а}^{МО}$ учитывали обязательные разработанные на производственных предприятиях организационно-технические мероприятия в периоды неблагоприятных метеорологических условий, при которых необходима организация сокращения выбросов $U_{мэ}$ и $U_{ст}$ до 60 % в зависимости от степени опасности периода [16].

Таблица 2

Показатели значимости ущерба МО в общем экологическом ущербе атмосфере и гидросфере НПТГ за 2022 г.

Table 2

Indicators of the significance of damage to municipal districts in the total environmental damage to the atmosphere and hydrosphere of HNEG for 2022

МО	$K_{э.а}^{МО}$	$a_а$	$K_{э.г}^{МО}$	$a_г$
«Старое Крюково»	4,67	0,28	0,0111	0,36
«Матушкино»	2,43	0,12	0,0033	0,12
«Савёлки»	3,58	0,20	0,0046	0,20
«Крюково»	5,80	0,36	–	0,04
«Силино»	1,70	0,04	0,0047	0,28

Полученные значения $K_{э.а}^{МО}$ свидетельствуют о существенном превышении максимальной техногенной нагрузки для атмосферы всех муниципальных округов НПТГ, что соответствует критическому уровню ее экологической безопасности. Степень экологической напряженности гидросферы НПТГ $K_{э.г}^{МО} \le 0{,}3$ указывает на сбалансированность водопользования при некоторых его различиях по МО.

Расчет интегрального показателя $K_{эi}$ по формуле (4) с учетом данных табл. 2 приводит к следующим текущим значениям интегрального показателя экологической устойчивости для двух компонентов НПТГ: для атмосферы $K_{э.а} = 4{,}47$; для гидросферы $K_{э.г} = 0{,}0066$. По результатам определения интегральных показателей экологической устойчивости основных компонентов НПТГ можно рассчитать интегральный коэффициент экологической опасности $K_{э.о}$ – сумму средовых интегральных показателей $K_{эi}$, взвешенных на показатель значимости загрязнения b_i каждой из рассматриваемых сред [11]:

$$K_{э.о} = \sum_{i=1}^{2} (K_{эi} b_i) \,.$$

Показатель значимости загрязнения конкретной среды b_i определяется долей экологического ущерба, наносимого i-й среде, в общем объеме ущерба от загрязнения территории. Следует отметить, что используемые в настоящее время значения всех трех показателей значимости b_i находятся на уровне 0,31–0,36 [7, 8, 11]. Это предполагает примерно равный уровень ущерба для трех компонентов геосистемы. В рассматриваемом случае в общем экологическом ущербе доминируют загрязнения атмосферы. Применение матричного метода парных сравнений показателей степени экологической напряженности с учетом иерархичности структур значений $K_{э\,i}$ для каждого компонента природной среды позволяет получить следующие значения показателя значимости: загрязнения атмосферы $b_а$ = 0,56; загрязнения гидросферы $b_г$ = 0,33. На основании данных табл. 2 рассчитан интегральный коэффициент экологической опасности $K_{э.о}$ с использованием базовых и скорректированных значений показателей значимости: для базовых значений $K_{э.о}$ = 1,61; для скорректированных значений $K_{э.о}$ = 2,5.

Скорректированные оценки значимости загрязнения разных сред позволили установить, что фактический интегральный коэффициент экологической опасности повышается на 36 %. Это позволяет утверждать, что состояние экологической безопасности НПТГ, сложившееся в настоящее время, критическое.

Прогноз уровня экологической безопасности осуществляется на основе экстраполяции значений $K_{э.о}$, в наибольшей степени характеризующей воздействие производства на компоненты геосистемы. При этом обоснованно предполагается, что значение $T_э$ как части биосферы, находящейся в состоянии стабильно подвижного равновесия, остается постоянным. Исходной информацией для прогнозирования $K_{э.о}$ является статистика производственно-экономических показателей предприятий микроэлектроники за период 2013–2022 гг. Точки, отражающие рост этих показателей и связанных с этим техногенных нагрузок и уровней экологической безопасности, аппроксимируются линейной функцией $y_{t+1} = cx + d$, коэффициенты c и d которой определяются методом наименьших квадратов (рис. 1 и 2). Независимая переменная x обозначает номер временного интервала (1, 2, 3…), который отсчитывается от начальной точки построения линейной регрессии, например x = 1 для 2013 г., x = 2 для 2014 г., x = 3 для 2015 г. и т. д.

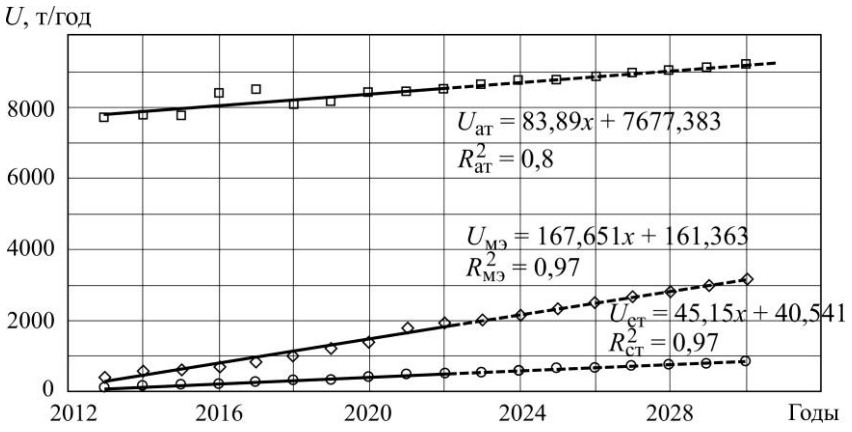


Рис. 1. Прогноз роста техногенной нагрузки от автотранспорта, производств микроэлектроники и других стационарных источников: □ – $U_{ат}$; ◊ – $U_{мэ}$; ○ – $U_{ст}$; - - - прогноз

Fig. 1. Forecast of growth of technogenic load from vehicles, microelectronics production and other stationary sources: □ – $U_{ат}$; ◊ – $U_{мэ}$; ○ – $U_{ст}$; - - - forecast

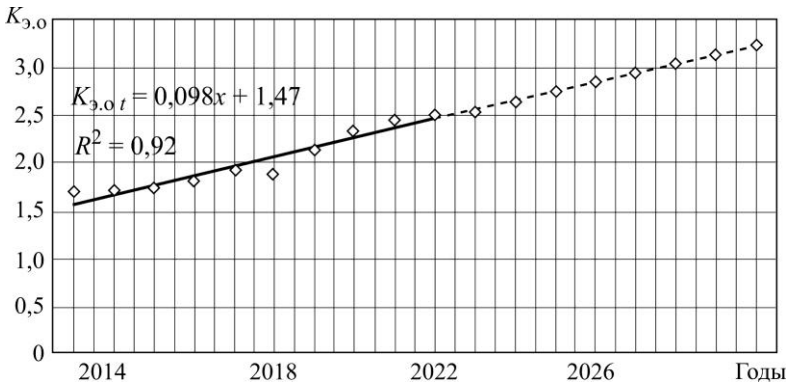


Рис. 2. Прогноз роста интегрального коэффициента экологической опасности при интенсификации производств микроэлектроники
Fig. 2. Forecast of the growth of the integral indicator of environmental hazard during the intensification of microelectronics production

В результате математической обработки статистических и расчетных данных получены уравнения регрессии, определяющие значения искомых величин к концу прогнозируемого периода (см. рис. 1 и 2).

Заключение. Наблюдаемое закономерное увеличение эмиссии загрязняющих веществ от всех источников техногенной нагрузки при неизменной экологической технoемкости НПТГ приведет к повышению интегрального коэффициента экологической опасности на 29 % к 2030 г по сравнению с 2022 г. Очевидно, что рост данного коэффициента на период до 2030 г. происходит в основном за счет увеличения техногенной нагрузки на атмосферу. Прогнозируемое увеличение коэффициента следует учитывать при модернизации системы экологического мониторинга и всей системы управления качеством окружающей среды.

Интенсификация производств микроэлектроники приведет к дальнейшему росту экологической напряженности, что необходимо учитывать при модернизации системы управления охраной окружающей среды, регулирующим инструментом которой может служить предложенный интегральный коэффициент.

Литература

1. ***Никулина Н. Л.*** Проблемы оценки экологической безопасности региона // Экономика региона. 2008. № S4. С. 62–67. EDN: JWVWPZ.

2. ***Слеснев М. А., Попов А. В.*** Экологическая емкость городских природно-антропогенных территориальных комплексов // Жилищное строительство. 2019. № 3. С. 57–60. https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-3-57-60. – EDN: RXTVDM.

3. ***Донченко В. К.*** Синтез-метод оценки диагностических уровней экологической емкости городов // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 87-4. С. 41–48. https://doi.org/10.18411/trnio-07-2022-133. – EDN: NDFOJI.

4. ***Жемадукова С. Р.*** Экологическая емкость территории и прогнозирование поведения эколого-экономической системы с помощью орграфов (на примере Республики Адыгея) // Новые технологии. 2008. № 6. С. 58–61. EDN: JWCCGN.

5. ***Мусихина Е. А., Айзенберг И. И., Михайлова О. С.*** Пространственно-временной метод оценки экологической емкости территорий // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 175–178. EDN: SFPCPJ.

6. ***Марунич Н. А.*** Оценка экологической емкости и биоресурсов экосистем Приднестровья с позиции энергетического анализа // Вестник Приднестровского университета. Серия: Медико-биологические и химические науки. 2015. № 2 (50). С. 179–181. EDN: XQXCTB.

7. ***Белик И. С.*** Эколого-экономическая безопасность: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 224 с. EDN: SXUQKH.

8. ***Акимова Т. А., Хаскин В. В.*** Экономика Природы и Человека. М.: Экономика, 2006. 334 с. EDN: OTXZUM.

9. ***Белик И. С., Никулина Н. Л.*** Методические подходы к оценке экологической безопасности региона // Вестник УГТУ-УПИ. Серия: Экономика и управление. 2006. № 1. С. 100–106. EDN: JUKLXB.

10. ГОСТ Р 56162–2019. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 12 с.

11. ***Завьялова О. Г., Дробот Е. В.*** Сравнительная оценка экологической емкости территории административных районов Кур[г]анской области // Зыряновские чтения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Курган, 09–10 дек. 2010). Курган: Курганский гос. ун-т, 2010. С. 190–191. EDN: YWTNQX.

12. ***Ларионов Н. М., Суханова Л. С., Кузьмичев Н. Ю., Кузьмичева А. Н.*** Определение методом инверсионной вольтамперометрии почвенных объектов Зеленоградского АО и Московской области // StudNet. 2021. № 7. С. 162–171. EDN: PDARZH.

13. ***Юлкина П. Н.*** Оценка физико-химических свойств почв г. Зеленоград // Материалы научно-практической конференции молодых ученых географов (28–29 марта 2018). М.: Перо, 2018. С. 205–210. EDN: XWCVKP.

14. ***Юзефович А. М., Кошелева Н. Е.*** Загрязнение почв селитебной зоны Москвы и его связь с природными и антропогенными факторами // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 35–42. EDN: KWYFAD.

15. ***Федосеева Н. В., Новогорная Э. Э., Тихонова И. О.*** Оценка экологического состояния малой р. Сходня // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 9 (178). С. 79–80. EDN: XEBMJP.

16. Приказ Минприроды РФ от 28.11.2019 г. № 811 «Об утверждении требований к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий» // Министерство юстиции Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: https://minjust.consultant.ru/documents/45003 (дата обращения: 17.04.2024).

Статья поступила в редакцию 23.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.11.2023 г.;
принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Харламов Николай Романович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kolya.kharlamov2017@yandex.ru

Рябышенков Андрей Сергеевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ryabyshenkov@mail.ru

Каракеян Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), zelikar@mail.ru

References

1. Nikulina N. L. Problems of the estimation of ecological safety of region. *Ekonomika regiona = Economy of Regions,* 2008, no. S4, pp. 62–67. (In Russian). EDN: JWVWPZ.

2. Slepnev M. A., Popov A. V. Ecological capacity of urban natural and anthropogenic territorial complexes. *Zhilishchnoye stroitel'stvo = Housing Construction,* 2019, no. 3, pp. 57–60. (In Russian). https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-3-57-60. – EDN: RXTVDM.

3. Donchenko V. K. Synthesis method for assessing the diagnostic levels of environmental capacity of cities. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya,* 2022, no. 87-4, pp. 41–48. (In Russian). https://doi.org/10.18411/trnio-07-2022-133. – EDN: NDFOJI.

4. Zhemadukova S. R. Ecological capacity of the territory and the ecological-economic system behavior forecasting using digraphs (the case of the Republic of Adygea). *Novyye tekhnologii = New technologies*, 2008, no. 6, pp. 58–61. (In Russian). EDN: JWCCGN.

5. Musikhina E. A., Aizenberg I. I., Mikhailova O. S. Space-time method for assessing the ecological territorial capacity. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2 (22), pp. 175–178. (In Russian). EDN: SFPCPJ.

6. Marunich N. A. Assessment of the ecological capacity and bioresources of Pridnestrovian ecosystems from the perspective of energy analysis. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Mediko-biologicheskiye i khimicheskiye nauki*, 2015, no. 2 (50), pp. 179–181. (In Russian). EDN: XQXCTB.

7. Belik I. S. *Eco-economic safety*, study guide. Ekaterinburg, Ural Univ. Publ., 2013. 224 p. (In Russian). EDN: SXUQKH.

8. Akimova T. A., Khaskin V. V. *Economics of Nature and Human.* Moscow, Ekonomika Publ., 2006. 334 p. (In Russian). EDN: OTXZUM.

9. Belik I. S., Nikulina N. L. Methodological approaches to assessing the environmental safety of the region. *Vestnik UGTU-UPI. Seriya: Ekonomika i upravleniye*, 2006, no. 1, pp. 100–106. (In Russian). EDN: JUKLXB.

10. GOST R 56162–2019. *Emissions of pollutants into the atmosphere. Method for calculating the amount of pollutant emissions generated by motor vehicle flows on roads of various categories.* Moscow, Standartinform Publ., 2019. iv, 12 p. (In Russian).

11. Zavyalova O. G., Drobot E. V. Comparative assessment of the ecological capacity of the territory of the administrative districts of the Kur[g]an region. *Zyryanovskiye chteniya*, proceedings of Russia-wide res.-to-pract. conf. (Kurgan, Dec. 09–10, 2010). Kurgan: Kurgan State Univ., 2010, pp. 190–191. (In Russian). EDN: YWTNQX.

12. Larionov N. M., Sukhanova L. S., Kuzmichev N. Yu., Kuzmicheva A. N. Determination by the method of stripping voltammetry of soil objects of Zelenograd AO and Moscow region. *StudNet*, 2021, no. 7, pp. 162–171. (In Russian). EDN: PDARZH.

13. Yulkina P. N. Assessment of physical and chemical soil characteristics in Zelenograd. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh geografov* (March 28–29, 2018). Moscow, Pero Publ., 2018, pp. 205–210. (In Russian). EDN: XWCVKP.

14. Yuzefovich A. M., Kosheleva N. E. Soil pollution in the residential area of Moscow and its connection with natural and anthropogenic factors. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*, 2009, no. 3, pp. 35–42. (In Russian). EDN: KWYFAD.

15. Fedoseeva N. V., Novogornaya E. E., Tikhonova I. O. Evaluation of the ecological state of small river Skhodnya. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2016, vol. 30, no. 9 (178), pp. 79–80. (In Russian). EDN: XEBMJP.

16. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia of Nov. 28, 2019 No. 811 "On approval of requirements for the measures to reduce emissions of pollutants into the atmosphere during periods of unfavorable meteorological conditions". *Ministerstvo yustitsii Rossiyskoy Federatsii.* (In Russian). Available at: https://minjust.consultant.ru/documents/45003 (accessed: 17.04.2024).

The article was submitted 23.10.2023; approved after reviewing 15.11.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Nikolay R. Kharlamov – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kolya.kharlamov2017@yandex.ru

Andrey S. Riabyshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ryabyshenkov@mail.ru

Valery I. Karakeyan – 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), zelikar@mail.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья
УДК 621.391.63:681.7.068
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-466-477
EDN: FVEBJA

Пространственные характеристики кремниевых фотоумножителей

И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина

Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Беларусь

o.kochergina@bsac.by

Аннотация. Технологии передачи данных оптическим излучением, такие как Li-Fi или FSO, характеризуются высокой скоростью передачи и уровнем защиты информации, безопасностью для человека. Одними из наиболее перспективных фотоприемников для реализации указанных технологий являются матричные многоэлементные лавинные фотоприемники – кремниевые фотоэлектрические умножители (Si-ФЭУ), пространственные характеристики которых изучены недостаточно. В работе изложены результаты исследований зависимости неравномерности чувствительности, отношения сигнал / шум и скорости регистрации информации от площади поперечного сечения оптического зонда и места падения регистрируемого излучения на фоточувствительную поверхность фотоприемника, влияния напряжения питания фотоприемника и экспозиции оптического излучения на характеристики исследуемых Si-ФЭУ. Для проведения исследований отобраны три Si-ФЭУ: KETEK PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035. Определено, что среднее значение амплитуды импульсов напряжения фотосигнала принимает максимальное значение при расположении пятна оптического зонда в центре фоточувствительной поверхности на значительной ее площади. Установлено, что при перемещении пятна оптического зонда от центра к краю фоточувствительной поверхности исследуемых Si-ФЭУ среднее значение амплитуды импульсов уменьшается, но не более чем на 30 %. Показано, что при увеличении площади засветки фоточувствительной поверхности фотоприемника, вплоть до значений, соответствующих 65 % полной площади, наблюдается значительный рост отношения сигнал / шум и скорости регистрации информации. Однако при дальнейшем увеличении площади засветки рост указанных параметров заметно замедляется. Выяснено, что для достижения максимального значения сигнал / шум и скорости передачи информации необходимо, чтобы оптическое излучение покрывало всю площадь Si-ФЭУ, а энергетическая экспозиция соответствовала уровню критического значения.

© И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, 2024

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, пространственные характеристики, площадь фоточувствительной поверхности, отношение сигнал / шум, скорость передачи информации, технология Li-Fi

Для цитирования: Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Пространственные характеристики кремниевых фотоумножителей // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 466–477. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-466-477. – EDN: FVEBJA.

Original article

Spatial properties of silicon photomultipliers

I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina

Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

o.kochergina@bsac.by

Abstract. Optical transmission technologies such as Li-Fi or FSO are characterized by high information transfer rate, information security level and safety for humans. Among the most promising photodetectors for the implementation of these technologies are matrix multi-element avalanche photodetectors – silicon photomultipliers (SiPM), the spatial properties of which are insufficiently studied. In this work, the results are given of the research on sensitivity unevenness, signal-to-noise ratio and information transfer rate dependence on cross section of optical probe and on registered radiation impingement point on photodetector's photosensitive surface, and on effect of photodetector the supply voltage and exposure of the optical radiation on characteristics of SiMPs under study. Three SiPMs, of which two are imported (KETEK RM 3325 and ON Semi FC 30035) and one domestic (KOF5-1035), have been selected for the study. The data obtained show that the average value of the photo-signal voltage pulse amplitude takes a maximum value when the optical probe spot is located in the center of the photosensitive surface over a significant area of it. It has been established that when the optical probe spot moves from the center to the edge of photosensitive surface of the SiPMs under study, the average value of pulse amplitude decreases but no more than by 30 %. It was demonstrated that at the increase of light exposure area of photodetector's photosensitive surface up to values corresponding to 65 % of full area the significant growth of signal-to-noise ratio and of information recording rate is observed. However, with further increase of light exposure area the growth of these parameters is appreciably slowed. It has been found that to achieve the maximum signal-to-noise ratio and information transfer rate, it is necessary that optical radiation covers the entire area of SiPM and the energy exposure conforms to level of critical value.

Keywords: silicon photomultiplier, spatial properties, photosensitive surface area, signal-to-noise ratio, information transfer rate, Li-Fi technology

For citation: Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Spatial properties of silicon photomultipliers. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 466–477. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-466-477. – EDN: FVEBJA.

Введение. Открытые системы связи, например DWDM, имеют несомненные преимущества перед кабельными в ситуациях, когда прокладка кабеля невозможна или затруднена ввиду географических особенностей либо сформированной городской инфраструктуры. Поэтому большое внимание уделяется разработке и развитию таких технологий, как Li-Fi и FSO, характеризующихся высокими скоростью передачи и уровнем защиты информации, безопасностью для человека [1–4]. Использование передовых технологий передачи информации требует развития соответствующих фотоприемников. Правильный выбор фотоприемника определяет максимальную скорость передачи данных для таких технологий.

Одним из наиболее перспективных фотоприемников для реализации оптических технологий передачи данных является кремниевый фотоэлектронный умножитель (Si-ФЭУ). Si-ФЭУ представляют собой лавинные фотоприемники, выполненные по матричной технологии. Такие фотоприемники имеют неоспоримые преимущества перед другими, поскольку у них высокая чувствительность в видимом диапазоне спектра оптического излучения, большие площади фоточувствительной поверхности, высокие коэффициенты усиления и низкие напряжения питания [5–9].

При использовании Si-ФЭУ для реализации технологий Li-Fi и FSO необходимо знать пространственные характеристики этих фотоприемников – зависимость параметров Si-ФЭУ от точки поступления оптического излучения на его фоточувствительную поверхность. Однако не все пространственные характеристики Si-ФЭУ изучены достаточно хорошо. К таким характеристикам можно отнести неравномерность чувствительности, зависимость отношения сигнал / шум и скорости регистрации информации от места падения и площади покрытия оптическим излучением фоточувствительной поверхности фотоприемника, влияние напряжения питания фотоприемника, площади покрытия оптическим излучением фоточувствительной поверхности фотоприемника и энергетической экспозиции на характеристики исследуемых Si-ФЭУ.

Цель настоящей работы – изучение пространственных характеристик Si-ФЭУ, а также влияния на них напряжения питания и энергетической экспозиции регистрируемого импульсного оптического излучения.

Экспериментальная установка и методика измерений. Для проведения исследования отобраны три Si-ФЭУ: KETEK PM 3325, ON Semi FC 30035 (импортные) и КОФ5-1035 (ОАО «Интеграл», Беларусь). Такой выбор обусловлен тем, что исследуемые фотоприемники имеют непринципиально отличающиеся полупроводниковые структуры и похожие характеристики.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Формирование импульсов оптического излучения осуществлялось системой, состоящей из генератора электрических импульсов, источника оптического излучения и набора нейтральных светофильтров. От генератора электрических импульсов импульсы напряжения поступают на вход источника оптического излучения и инициируют импульсы излучения с длиной волны $\lambda = 470$ нм длительностью $\tau = 1$ мкс и частотой $f = 10^4$ Гц, которые затем ослабляются набором нейтральных светофильтров. Выбранное значение длительности импульса оптического излучения при засветке Si-ФЭУ обеспечивает наибольшее значение амплитуды электрических импульсов фотоотклика $U_{\text{п}}$ и наименьшее значение их среднеквадратического отклонения σ [10]. Уменьшение длительности импульса в данных условиях регистрации не вызывает заметного уменьшения длительности фотоотклика. Выбор частоты следования импульсов обусловлен влиянием послеимпульсных явлений, которые возникают в Si-ФЭУ после окончания регистрации импульса оптического излучения и затрудняют регистрацию следующего за ним оптического импульса. Длина волны соответствует максимуму спектральной чувствительности всех исследуемых Si-ФЭУ [11].

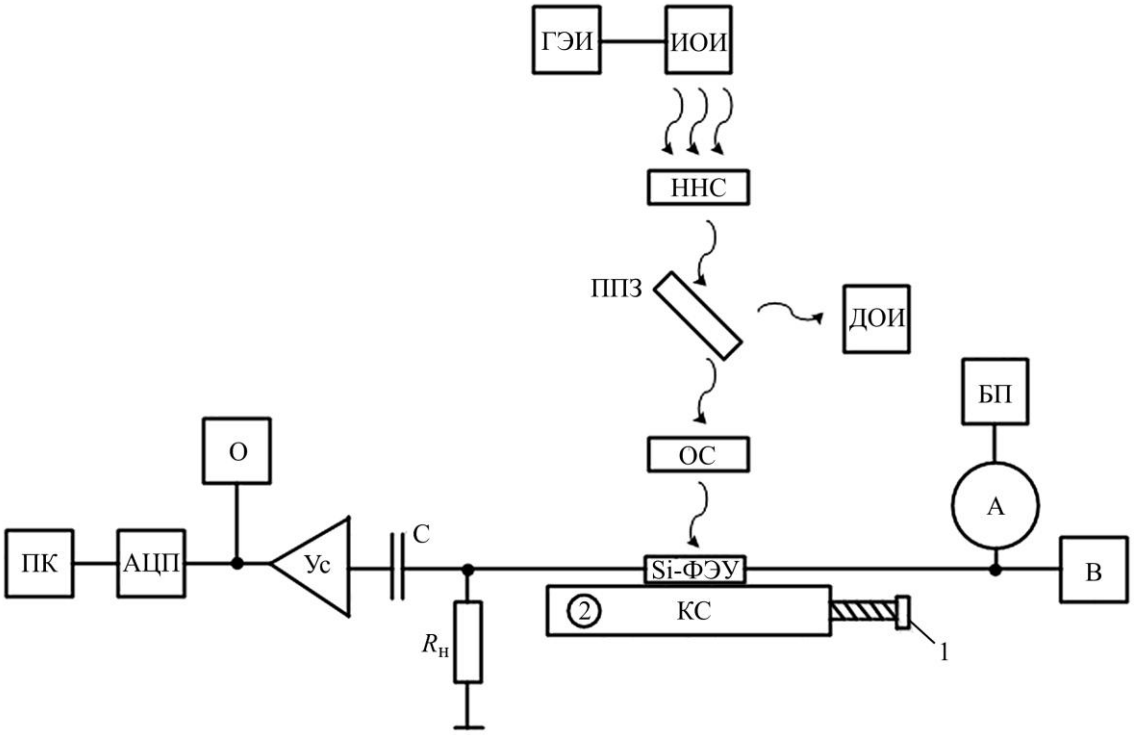


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: ГЭИ – генератор электрических импульсов; ИОИ – источник оптического излучения; ННС – набор нейтральных светофильтров; ППЗ – полупрозрачное зеркало; ДОИ – дозиметр оптического излучения; ОС – оптическая система; ПК – персональный компьютер; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; О – осциллограф; Ус – усилитель; С – конденсатор; $R_н$ – сопротивление нагрузки; КС – координатный столик; БП – блок питания фотоприемника; А – амперметр; В – вольтметр; 1 и 2 – индикаторные микрометры

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: ГЭИ – electrical pulse generator; ИОИ – source of optical radiation; ННС – a set of neutral density filters; ППЗ – translucent mirror; ДОИ – optical radiation dosimeter; ОС – optical system; ПК – computer; АЦП – analog-to-digital converter; О – oscilloscope; Ус – amplifier; С – capacitor; $R_н$ – load resistance; Si-ФЭУ – silicon photomultiplier; КС – coordinate table; БП – photodetector power supply; А – ammeter; В – voltmeter; 1 and 2 – indicator micrometers

Энергетическую экспозицию оптического излучения H на выходе набора нейтральных светофильтров можно изменять в диапазоне 10^{-8}–10^{-11} Дж/м^2. При таких значениях H обеспечивается работа исследуемых фотоприемников в пределах их динамического диапазона. Определение точного значения и контроль энергетической экспозиции осуществляли с помощью дозиметра оптического излучения марки ЛД-07. Для этого импульсное оптическое излучение разделяли полупрозрачным зеркалом на два равнозначных пучка, один из которых подавался на дозиметр оптического излучения, а второй поступал в оптическую систему. Оптическая система формирует на фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ световое пятно оптического зонда круглой формы, диаметр d которого можно изменять от 0,13 до 3,40 мм [12]. Площадь светового пятна оптического зонда A_0 при этом изменяется от 0,012 до 9,00 мм^2. Размер фоточувствительной поверхности кремниевых Si-ФЭУ KETEK PM 3325 и ON Semi FC 30035 составляет 3 × 3 мм, а КОФ5-1035 равен 1,25 × 1,25 мм.

Si-ФЭУ располагается на координатном столике (см. рис. 1). С помощью индикаторных микрометров пятно оптического зонда перемещали в двух взаимно перпендикулярных направлениях горизонтальной плоскости. Блок питания позволяет регулировать напряжение питания $U_{пит}$ Si-ФЭУ, которое контролировали вольтметром. Ток,

протекающий через Si-ФЭУ, измеряли амперметром. При регистрации импульсного оптического излучения изменяли протекающий через Si-ФЭУ электрический ток, в результате чего на резисторе нагрузки $R_н$ = 1 кОм формировались импульсы напряжения, для отделения которых от постоянной составляющей напряжения питания использовали конденсатор. Сформированные на резисторе нагрузки электрические импульсы усиливали усилителем и оцифровывали с помощью АЦП. Данные передавали в ПК. Вид электрических импульсов на выходе усилителя контролировали осциллографом. Для вычисления среднего значения амплитуды импульсов напряжения $<U_п>$, являющегося фотосигналом, и их среднего квадратичного отклонения σ использовали программное обеспечение.

Отношение сигнал / шум на выходе Si-ФЭУ определяется формулой [11]

$$\rho = \frac{<U_п>^2}{2\sigma^2}. \quad (1)$$

Неравномерность чувствительности исследуемых Si-ФЭУ определяли согласно методике, описанной в работе [12]. Фотоприемник закрепляли на координатном столике и перемещали в заданном направлении, чтобы изменять положение пятна оптического излучения на фоточувствительной поверхности. Регистрировали амплитуды импульсов напряжения $U_п$ и определяли их максимальное значение и соответствующие этому пиковому значению амплитуды координаты пятна оптического излучения. Затем путем последовательного перемещения фотоприемника в разных направлениях и фиксирования координат положения пятна оптического излучения измеряли среднее значение амплитуды $<U_п>$ сформированных на $R_н$ импульсов и их среднеквадратичное отклонение σ. Данный алгоритм выполняли до тех пор, пока пятно оптического излучения не достигало края фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ.

Неравномерность среднего значения амплитуды импульсов равна:

$$\delta = \frac{U_{max} - U_{min}}{<U_п>_{ср}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где U_{max} и U_{min} – максимальное и минимальное значения $<U_п>$ соответственно.

Шаг, с которым перемещали пятно оптического зонда, подбирали так, чтобы число точек измерения было не менее 10.

При проведении измерений определяли скорость передачи информации по следующей формуле [13]:

$$S = F \log_2 (1+\rho),$$

где ширина полосы частот системы регистрации Si-ФЭУ равна:

$$F = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Здесь R – последовательное сопротивление, состоящее из собственного сопротивления Si-ФЭУ и сопротивления нагрузки; C – емкость Si-ФЭУ.

Для всех исследуемых Si-ФЭУ F = 1,6 МГц при данном $R_н$.

Поскольку исследуемые Si-ФЭУ имеют разные напряжения пробоя $U_{пр}$, то для сравнения их характеристик используется перенапряжение $\Delta U = U_{пит} - U_{пр}$. Напряжение пробоя определяется по ВАХ Si-ФЭУ при отсутствии засветки оптическим излучением по методике, описанной в работе [14]. Напряжение пробоя исследуемых фотоприемников составило 24,7; 27,0; 30,0 В для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 соответственно. Все измерения проводили при комнатной температуре (T = 293 К) в диа-

пазоне перенапряжений ΔU = – 0,5…1,0 В. Диапазон исследуемых перенапряжений ограничивали малыми коэффициентами усиления и большими значениями темновых токов.

Результаты измерений и их обсуждение. Максимальное значение $<U_п>$ получено при расположении пятна оптического зонда в центре фоточувствительной поверхности на значительной площади, затем $<U_п>$ уменьшается при перемещении к краю поверхности симметрично относительно центра (рис. 2, *а*). На рис. 2, *б* представлена зависимость $<U_п>$ от положения пятна оптического зонда вдоль одной из диагоналей фотоприемника при перенапряжении ΔU = 0, энергетической экспозиции H = 1,0 нДж/м^2 и диаметре оптического зонда d = 0,125 мм. Значения диагоналей составили 4,2 мм для ON Semi FC 30035, KETEK PM 3325 и 1,76 мм для КОФ5-1035 соответственно.

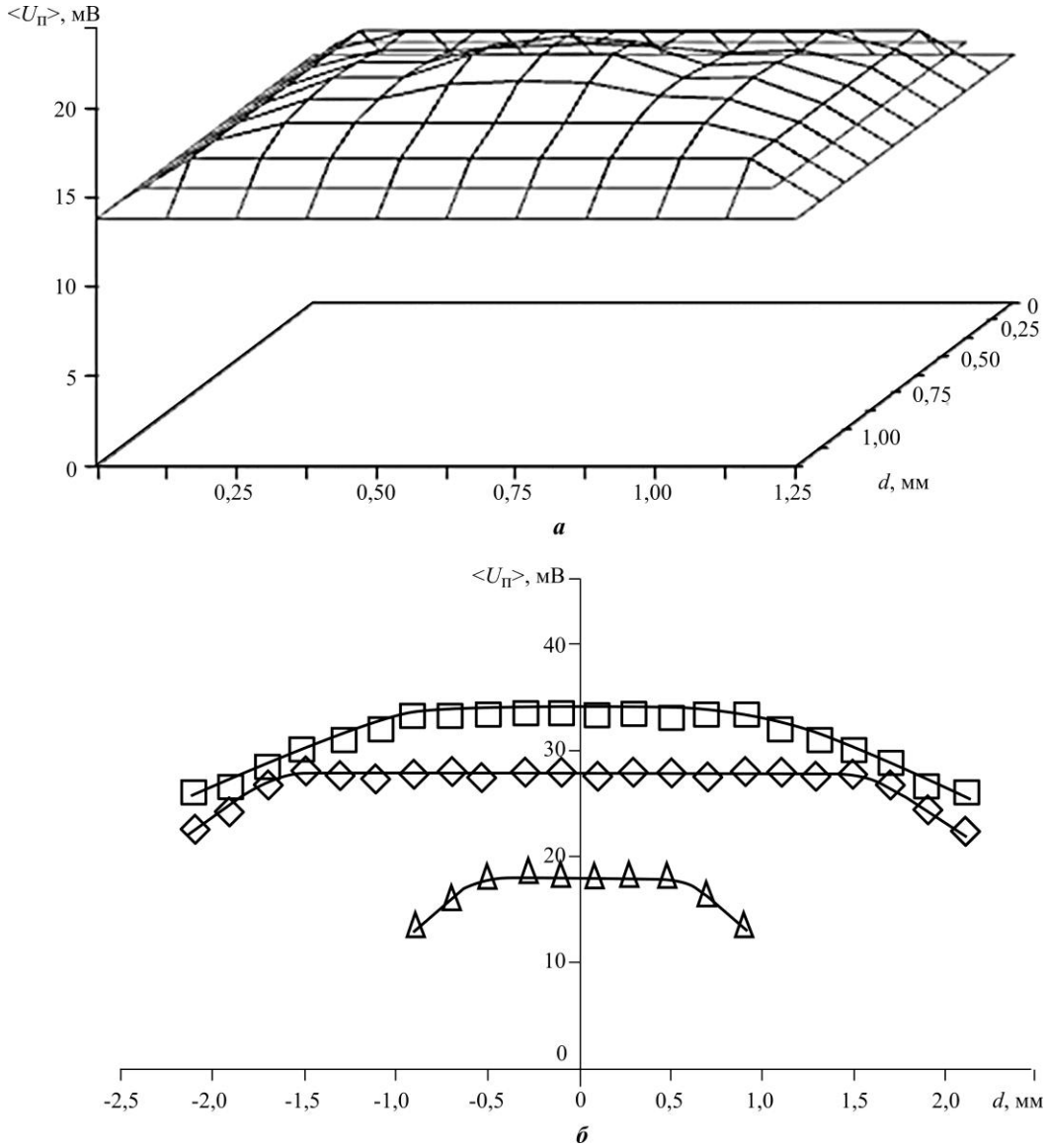


Рис. 2. Зависимость среднего значения амплитуды импульсов напряжения $<U_п>$ от положения пятна оптического зонда: *а* – КОФ5-1035; *б* – вдоль одной из диагоналей фотоприемника; □ – KETEK PM 3325; ◊ – ON Semi FC 30035; Δ – КОФ5-1035

Fig. 2. Dependence of the average amplitude of voltage pulses $<U_п>$ on the position of the optical probe spot: *a* – KOF5-1035; *b* – along one of the diagonals of the photodetector; □ – KETEK PM 3325; ◊ – ON Semi FC 30035; Δ – KOF5-1035

При расположении пятна оптического зонда в центре фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ $<U_п>$ = 33,5; 28,1; 18,7 мВ для KETEK PM 3325; ON Semi FC 30035; КОФ5-1035, а в крайних точках $<U_п>$ = 26,1; 22,5; 13,8 мВ для KETEK PM 3325; ON Semi FC 30035; КОФ5-1035 соответственно. Максимальное значение $<U_п>$ соответствует KETEK PM 3325, а минимальное – КОФ5-1035, что обусловлено различной чувствительностью данных фотоприемников [11]. Так как напряжение лавинного пробоя отдельных ячеек Si-ФЭУ может отличаться, то и чувствительность отличается в каждой точке положения пятна оптического излучения, т. е. для одного и того же напряжения питания на каждой ячейке будет разное значение перенапряжения. При приближении к краю фоточувствительной поверхности чувствительность ячеек Si-ФЭУ уменьшается, наблюдается снижение $<U_п>$ до 30 % от максимального значения. Это обусловлено, по-видимому, недостатками технологий изготовления фотоумножителей.

На рис. 3 представлен график зависимостей $<U_п>$, σ и ρ при постоянном значении H от ΔU для d = 0,125 мм. На рисунке показаны наиболее типичные зависимости, полученные для ON Semi FC 30035 при положении пятна, для которого наблюдаются максимальные значения $<U_п>$, и при постоянной энергетической экспозиции H = 1,0 нДж/м^2. Видно, что увеличение ΔU приводит к увеличению $<U_п>$ и σ. Зависимость отношения сигнал / шум от перенапряжения имеет максимум, соответствующий напряжению пробоя Si-ФЭУ.

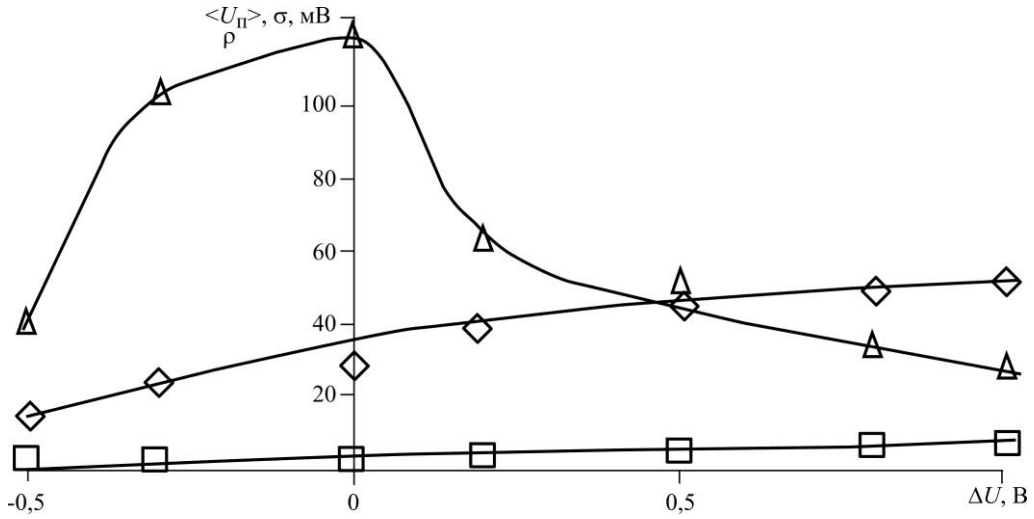


Рис. 3. Зависимость среднего значения амплитуды импульсов напряжения $<U_п>$ (◊), среднеквадратичного отклонения σ (□) и отношения сигнал / шум ρ (Δ) от перенапряжения ΔU

Fig. 3. Dependence of the average amplitude of voltage pulses $<U_п>$ (◊), standard deviation σ (□) and signal-to-noise ratio ρ (Δ) on overvoltage ΔU

Для фотоумножителей ON Semi FC 30035 при ΔU = –0,5 В параметр ρ = 40, при ΔU = 0 параметр ρ = 122, при ΔU = 1,0 В параметр ρ = 29. Для других исследуемых фотоприемников зависимость отношения сигнал / шум от перенапряжения аналогичная. Так, для KETEK PM 3325 ρ = 56, 144, 44 при ΔU = –0,5; 0; 1,0 В соответственно. Для КОФ5-1035 ρ = 32, 114, 26 при ΔU = –0,5; 0; 1,0 В соответственно.

Определено критическое значение энергетической экспозиции, соответствующее участку зависимости $<U_п>$ (H), в котором отклонение $<U_п>$ от линейной зависимости составляет не более 20 %. Увеличение энергетической экспозиции до критического значения, которое составляет $H_{кр}$ = 1,7; 1,0; 3,0 нДж/м^2 для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 соответственно, при постоянном перенапряжении, соответствующем напряжению пробоя и d = 0,125 мм, приводит к увеличению $<U_п>$ и их σ.

При значениях $H > H_{кр}$ наблюдается насыщение зависимости и установление значений $<U_п>$ на уровне 53,6; 33,5; 35,4 мВ и σ на уровне 3,2; 2,0; 2,2 мВ для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035. Отношение сигнал / шум при критической экспозиции принимало наибольшее значение и составило ρ = 140, 144, 130 для ON Semi FC 30035, KETEK PM 3325, КОФ5-1035.

Из рис. 4 видно, что неравномерность $<U_п>$ уменьшается от 31,2; 33,3; 37,5 % для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 при ΔU = – 0,5 В и до 25,7; 29,3; 26,7 % при ΔU = 1,0 В. Для анализа зависимости неравномерности $<U_п>$ от ΔU введем параметр $\Delta\delta/\Delta U_п$, где Δδ – изменение неравномерности чувствительности при изменении перенапряжения $\Delta U_п$. Тогда в диапазоне перенапряжений ΔU = – 0,5...0 В параметр $\Delta\delta/\Delta U_n$ = 3,9; 2,1; 9,1 %/В для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035, а в диапазоне ΔU = 0...1,0 В параметр $\Delta\delta/\Delta U_n$ = 1,6; 1,9; 1,8 %/В соответственно.

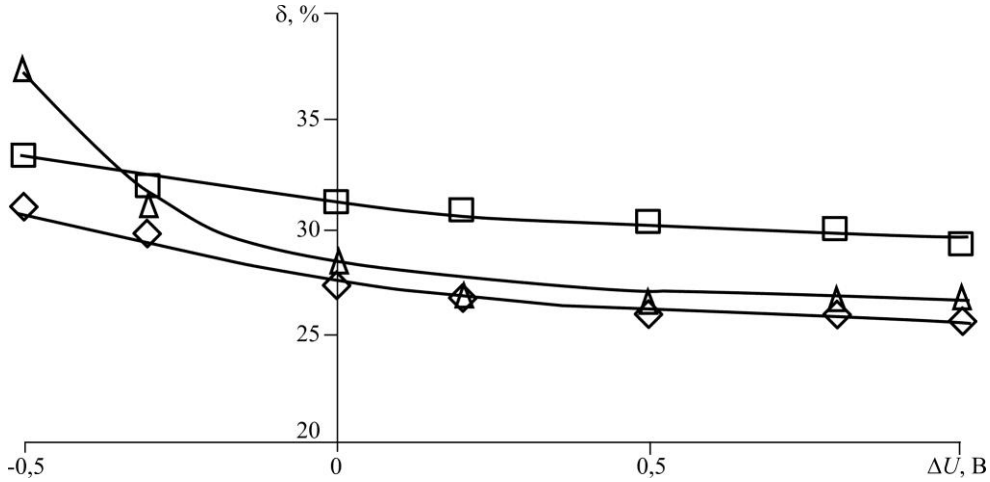


Рис. 4. Зависимость неравномерности среднего значения амплитуды импульсов от перенапряжения:
□ – KETEK PM 3325; Δ – КОФ5-1035; ◊ – ON Semi FC 30035
Fig. 4. Dependence of the unevenness of the average value of the pulse amplitude on overvoltage:
□ – KETEK PM 3325; Δ – KOF5-1035; ◊ – ON Semi FC 30035

Таким образом, более сильная зависимость неравномерности чувствительности от перенапряжения проявляется при $\Delta U < 0$. Максимальное значение неравномерности $<U_п>$ в диапазоне ΔU = –0,3...1,0 В соответствует KETEK PM 3325, а в диапазоне ΔU = –0,5...–0,3 В – КОФ5-1035. Минимальное значение неравномерности чувствительности наблюдается для ON Semi FC 30035 во всем исследуемом диапазоне перенапряжений. Изменение энергетической экспозиции в пределах динамического диапазона Si-ФЭУ [15] при постоянных ΔU и d не приводит к изменениям неравномерности чувствительности.

Наблюдается линейная зависимость ρ(H). Для оценки линейности введем параметр $\Delta\rho/\Delta H$, где Δρ – изменение отношения сигнал / шум при изменении величины ΔH. При ΔU = 0 и d = 0,125 мм параметр $\Delta\rho/\Delta H = 82\cdot10^9$; $144\cdot10^9$; $43\cdot10^9$ м^2/Дж для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 соответственно. Таким образом, наиболее сильно зависимость ρ от H наблюдается для КОФ5-1035 и наименее – для ON Semi FC 30035.

На рис. 5 приведена зависимость ρ и S от площади покрытия оптическим излучением фоточувствительной поверхности фотоприемника A_0/A при перенапряжении ΔU = 0 и H = 1,0 нДж/м^2. Площадь покрытия оптическим излучением фоточувствительной поверхности характеризуется отношением площади светового пятна оптического зонда к площади фоточувствительной поверхности фотоприемника A_0/A.

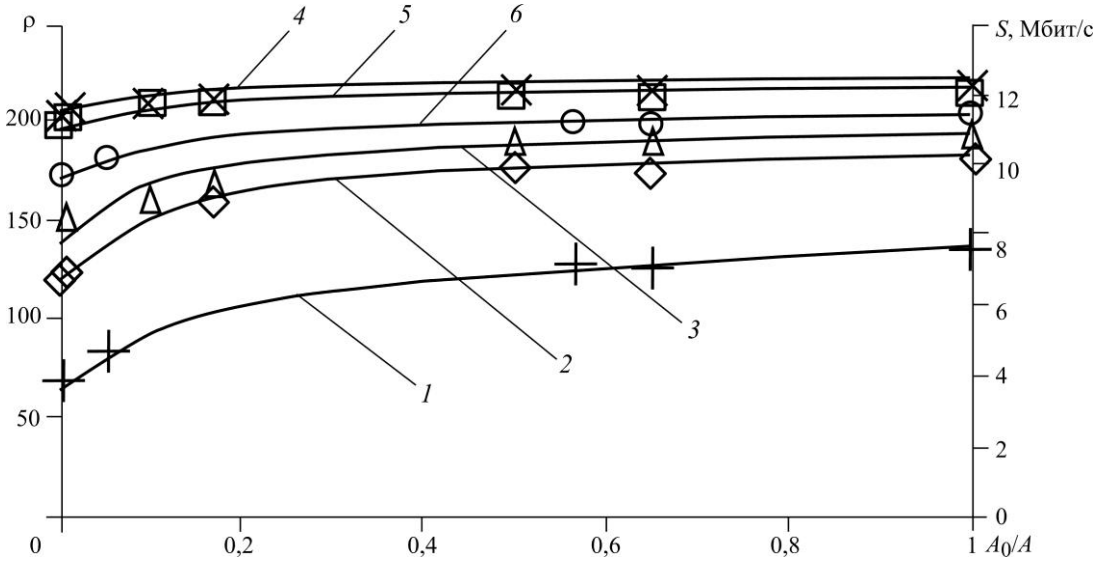


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал / шум ρ (кривые *1*, *2*, *3*) и скорости регистрации информации *S* (кривые *4*, *5*, *6*) от площади покрытия оптическим излучением A_0/A фоточувствительной поверхности фотоприемника: *3*, *4* – KETEK PM 3325; *2*, *5* – ON Semi FC 30035; *1*, *6* – КОФ5-1035

Fig. 5. Dependence of the signal-to-noise ratio ρ (curves *1*, *2*, *3*) and the speed of information recording *S* (curves *4*, *5*, *6*) on the A_0/A area of the photosensitive surface of the photodetector: *3*, *4* – KETEK PM 3325; *2*, *5* – ON Semi FC 30035; *1*, *6* – KOF5-1035

Из рис. 5 видно, что увеличение диаметра светового пятна, т. е. площади покрытия оптическим излучением фоточувствительной поверхности фотоприемника, приводит к увеличению отношения сигнал / шум и скорости регистрации информации. При увеличении площади покрытия оптическим излучением фоточувствительной поверхности фотоприемника более 65 % от полной площади наблюдается замедление роста отношения сигнал / шум и скорости регистрации информации. Максимальное значение ρ и *S* соответствует площади покрытия оптическим излучением всей фоточувствительной поверхности $A_0/A = 1$. При $A_0 = 0{,}65A$ параметр $\langle U_п \rangle$ = 75, 90, 60 мВ, σ = 4,0; 4,6; 3,8 мВ для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 соответственно. При полном покрытии оптическим излучением фоточувствительной поверхности $\langle U_п \rangle$ = 84, 95, 66 мВ, σ = 4,4; 4,8; 4,0 мВ для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 соответственно. Эти изменения связаны с тем, что коэффициент усиления Si-ФЭУ зависит от числа засвеченных ячеек [16]. При $\Delta U = 0$, $H_{кр}$ и $A_0 = 0{,}012$ мм^2 скорость регистрации информации составила *S* = 11,9; 11,4; 10,8 Мбит/с для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 соответственно, а при полной засветке *S* = 12,4; 12,2; 12,8 Мбит/с для ON Semi FC 30035; KETEK PM 3325; КОФ5-1035 соответственно.

Рост значения скорости регистрации информации обеспечивается за счет увеличения площади покрытия оптическим излучением фоточувствительной поверхности фотоприемника. При оптимизации реализации технологии Li-Fi удалось обеспечить значения скорости регистрации информации *S* = 40, 59, 72 Мбит/с для KETEK PM 3325, ON Semi FC 30035, КОФ5-1035 соответственно [17].

Заключение. Установлено, что среднее значение амплитуды импульсов напряжения на сопротивлении нагрузки принимает максимальное значение при расположении пятна оптического излучения в центре фоточувствительной поверхности на площади, оставляющей около 65 % от всей площади фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ. При перемещении пятна оптического излучения от центра к краю фоточувствительной

поверхности исследуемых Si-ФЭУ наблюдается снижение среднего значения амплитуды импульсов, но не более чем на 30 % от максимального значения.

Таким образом, для достижения максимального значения сигнал / шум и скорости регистрации информации необходимо покрывать оптическим излучением всю площадь фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ и поддерживать энергетическую экспозицию на уровне критического значения.

Литература

1. ***Roncali E., Cherry S. R.*** Application of silicon photomultipliers to positron emission tomography // Ann. Biomed. Eng. 2011. Vol. 39. No. 4. P. 1358–1377. https://doi.org/10.1007/s10439-011-0266-9

2. Photodetectors: Materials, devices, and applications / ed. ***B. Nabet***. Cambridge: Woodhead Publ., 2015. 550 p.

3. ***Ma H., Lampe1 L., Hranilovic S.*** Robust MMSE linear precoding for visible light communication broadcasting systems // 2013 IEEE Globecom Workshop (GC Wkshps). Atlanta, GA: IEEE, 2013. P. 1081–1086. https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2013.6825136

4. ***Trichili A., Cox M. A., Ooi B. S., Alouini M.-S.*** Roadmap to free space optics // J. Opt. Soc. Am. B. 2020. Vol. 37. Iss. 11. P. A184–A201. https://doi.org/10.1364/JOSAB.399168

5. ***Shin J., Yoo H.*** Photogating effect-driven photodetectors and their emerging applications // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. Iss. 5. Art. No. 882. https://doi.org/10.3390/nano13050882

6. ***Gundacker S., Heering A.*** The silicon photomultiplier: Fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector // Phys. Med. Biol. 2020. Vol. 65. No. 17. Art. ID: 17TR01. https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab7b2d

7. Кремниевый фотоэлектронный умножитель: новые возможности / ***С. Клемин, Ю. Кузнецов, Л. Филатов и др.*** // Электроника: НТБ. 2007. № 8 (82). С. 80–86. EDN: MXFDPF.

8. ***Stagliano M., D'Errico F., Abegão L., Chierici A.*** Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics // EPH – International Journal of Science and Engineering. 2018. Vol. 4. No. 10. P. 7–15. https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143

9. ***Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K.*** Two-photon imaging with silicon photomultipliers // Opt. Express. 2019. Vol. 27. Iss. 24. P. 35830–35841. https://doi.org/10.1364/OE.27.035830

10. ***Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В.*** Исследование шумовых характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей при регистрации оптических импульсов // Проблемы инфокоммуникаций. 2020. № 2-2 (12). С. 41–46. EDN: TQQQRO.

11. ***Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В.*** Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 2. С. 164–171. EDN: FWZGRZ.

12. ГОСТ Р 59607–2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства: Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. IV, 54 с.

13. ***Шубин В. В.*** Информационная безопасность волоконно-оптических систем: монография. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 258 с. https://doi.org/10.53403/9785951502421. – EDN: ZZIHFC.

14. ***Гулаков И. Р., Зеневич А. О.*** Фотоприемники квантовых систем. Минск: УО ВГКС, 2012. 276 с. EDN: POAPCX.

15. ***Зеневич А. О., Кочергина О. В.*** Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 1. С. 30–39. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39. – EDN: YRZZSA.

16. ***Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Сорока С. А.*** Влияние параметров оптического излучения на амплитудные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2020. Т. 65. № 1. С. 104–109. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109

17. Исследование пропускной способности оптического канала с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя / ***В. Б. Залесский, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 50–58. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-50-58. – EDN: DAYHAA.

Статья поступила в редакцию 12.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.10.2023 г.;
принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Гулаков Иван Романович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи (Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2), gulakov@bsu.by

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

References

1. Roncali E., Cherry S. R. Application of silicon photomultipliers to positron emission tomography. *Ann. Biomed. Eng.*, 2011, vol. 39, no. 4, pp. 1358–1377. https://doi.org/10.1007/s10439-011-0266-9

2. Nabet B., ed. *Photodetectors: Materials, devices, and applications.* Cambridge, Woodhead Publ., 2015. 550 p.

3. Ma H., Lampe1 L., Hranilovic S. Robust MMSE linear precoding for visible light communication broadcasting systems. *2013 IEEE Globecom Workshop (GC Wkshps).* Atlanta, GA, IEEE, 2013, pp. 1081–1086. https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2013.6825136

4. Trichili A., Cox M. A., Ooi B. S., Alouini M.-S. Roadmap to free space optics. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2020, vol. 37, iss. 11, pp. A184–A201. https://doi.org/10.1364/JOSAB.399168

5. Shin J., Yoo H. Photogating effect-driven photodetectors and their emerging applications. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, iss. 5, art. no. 882. https://doi.org/10.3390/nano13050882

6. Gundacker S., Heering A. The silicon photomultiplier: Fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector. *Phys. Med. Biol.*, 2020, vol. 65, no. 17, art. ID: 17TR01. https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab7b2d

7. Clemin S., Kuznetsov J., Filatov L., Budjan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Popova E. Silicon photoelectronic multiplier: New opportunity. *Elektronika: NTB = Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8 (82), pp. 80–86. (In Russian). EDN: MXFDPF.

8. Stagliano M., D'Errico F., Abegão L., Chierici A. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics. *EPH – International Journal of Science and Engineering*, 2018, vol. 4, no. 10, pp. 7–15. https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143

9. Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. Two-photon imaging with silicon photomultipliers. *Opt. Express*, 2019, vol. 27, iss. 24, pp. 35830–35841. https://doi.org/10.1364/OE.27.035830

10. Asayonak M. A., Zianevich A. A., Kochergina O. V., Novikau Y. U. Investigation of noise characteristics of silicon photoelectronic multipliers when registering optical pulses. *Problemy infokommunikatsiy*, 2020, no. 2-2 (12), pp. 41–46. (In Russian). EDN: TQQQRO.

11. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of the spectral characteristics of silicon photomultiplier tubes. *Uspekhi prikladnoy fiziki = Advances in Applied Physics*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 164–171. (In Russian). EDN: FWZGRZ.

12. GOST R 59607–2021. *Optics and photonics. Semiconductor radiation receivers. Photoelectric and photodetector devices: Methods for photoelectric parameters measuring and properties characterization.* Moscow, Ros. in-t standartizatsii Publ., 2021. iv, 54 p. (In Russian).

13. Shubin V. V. *Information security of fiber-optic systems*, monograph. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2015. 258 p. (In Russian). https://doi.org/10.53403/9785951502421. – EDN: ZZIHFC.

14. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of quantum systems.* Minsk, UO HSCC Publ., 2012. 276 p. (In Russian). EDN: POAPCX.

15. Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of dynamic range of silicon photoelectronic multiplyers. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 30–39. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39. – EDN: YRZZSA.

16. Asayonak M. A., Zenevich A. O., Novikau Ya. V., Saroca S. A. Influence of optical radiation parameters on the amplitude characteristics of silicon photoelectron multipliers. *Vescì Nacyânal'naj akadèmìi navuk Belarusì. Seryâ fizìka-tèhnìčnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 104–109. (In Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109

17. Zalessky V. B., Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Tsymbal V. S. Investigation of the optical communication channel throughput with an information receiver in the form of a silicon photomultiplier. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 50–58. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-50-58. – EDN: DAYHAA.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 23.10.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Ivan R. Gulakov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Mathematics and Physics Department, Belarusian State Academy of Communications (Belarus, 220114, Minsk, F. Skorina st., 8/2), gulakov@bsu.by

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

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

Научная статья
УДК 621.382
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-478-488
EDN: CRYZZG

Моделирование транзистора с плавающим затвором на основе ван-дер-ваальсового гетероперехода графен/h-BN/MoS_2

Р. М. Мефтахутдинов

Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия
НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

postbox.mrm@gmail.com

Аннотация. Транзисторы на основе кремниевых технологий характеризуются значительным рассеянием мощности. Однако масштабирование кремниевых транзисторов не удается при длине затвора менее 5 нм из-за эффектов короткого канала. Требуемая высокая плотность синапсов не позволяет использовать устройства на основе кремния для нейроморфных приложений. Существует широкое разнообразие устройств электрически стираемой энергонезависимой памяти с различными электронными архитектурами, среди них транзисторы с плавающим затвором представляют наибольший интерес для исследователей. В настоящей работе рассмотрен транзистор с плавающим затвором на основе ван-дер-ваальсового гетероперехода графен/h-BN/MoS_2, построена многомасштабная модель устройства и осуществлена ее реализация. С использованием DFT-методов (Density Functional Theory) изучены физические свойства гетероструктуры. Для исследования передаточных характеристик использована модель Шичмана – Ходжеса. Показано, что плавающий затвор заряжается за счет туннельного эффекта Фаулера – Нордгейма и прямого туннелирования. Проведенные расчеты показали, что представленное устройство имеет высокое быстродействие (при напряжении на затворе 9 В время записывания составляет 50 нс). Окно памяти может быть настроено изменением диапазона развертки напряжения на управляющем электроде. Кроме того, устройство демонстрирует особенности биологического синапса, такие как импульсное потенциирование и пластичность, которые выражаются в возможности настраивать проводимость канала электрическим импульсом, подаваемым на затвор. Эти функции являются важными для процесса обучения и, таким образом, открывают возможности для использования транзистора для нейроморфных приложений.

Ключевые слова: DFT-расчеты, мемристор, транзистор с плавающим затвором, синаптическая пластичность

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект FNRM-2022-0008).

© Р. М. Мефтахутдинов, 2024

Для цитирования: Мефтахутдинов Р. М. Моделирование транзистора с плавающим затвором на основе ван-дер-ваальсового гетероперехода графен/h-BN/MoS_2 // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 478–488. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-478-488. – EDN: CRYZZG.

Original article

Simulation of a floating gate transistor based on a graphene/h-BN/MoS_2 van der Waals heterojunction

R. M. Meftakhutdinov

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia
SMC "Technological Centre", Moscow, Russia

postbox.mrm@gmail.com

Abstract. Silicon technology-based transistors are characterized by significant stand-by power dissipation. However, Si transistor sizing could not be performed when gate length is less than 5 nm because of short-channel effects. The required high synaptic densities disallow the use of Si devices for neuromorphic applications. There is a wide variety of electrically erasable non-volatile memory devices with different electronic architectures, of which floating gate transistors represent the most promising class. In this work, a floating gate transistor based on a graphene/h-BN/MoS_2 van der Waals heterojunction is considered, a multiscale model of the device is constructed and its implementation is carried out. Using DFT (Density Functional Theory) methods, the physical properties of the heterostructure were studied. To study the transfer characteristics, a simplified Shichman – Hodges model was used. It was demonstrated that the floating gate is charged by the Fowler – Nordheim tunneling effect and direct tunneling. The calculations showed that the presented device demonstrates high performance (at 9 V gate voltage, write time is 50 ns). The memory window can be adjusted by changing the voltage sweep range of the control electrode. In addition, the device demonstrates the characteristics of a biological synapse, such as impulse potentiation and plasticity, which are expressed in the ability to tune the channel conductivity by electric impulse fed to transistor gate. These features are important for the learning process, and thus open up the possibility of using the transistor for neuromorphic applications.

Keywords: DFT calculations, memristor, floating gate transistor, synaptic plasticity

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project FNRM-2022-0008).

For citation: Meftakhutdinov R. M. Simulation of a floating gate transistor based on a graphene/h-BN/MoS_2 van der Waals heterojunction. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 478–488. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-478-488. – EDN: CRYZZG.

Введение. Обработка и хранение информации с помощью традиционных компьютеров реализуются разными элементами, поэтому возникают сложности при обработке больших объемов данных. Этот недостаток можно устранить использованием нейро-

морфных вычислительных технологий, имитирующих некоторые функции человеческого мозга, обладающего способностью к высокопараллельным вычислениям и адаптивному обучению. В нейроморфных вычислениях обработка и хранение данных осуществляются одним элементом (объектом). Такой элемент можно рассматривать как электрический аналог синапса. Кроме расширения вычислительных возможностей, таких как обработка больших объемов данных, машинное обучение и распознавание образов, имитация функциональности синапсов и их плотность, эквивалентная плотности в мозге, может обеспечивать сокращение потребления энергии. Так, например, современная видеокарта, содержащая 10 752 универсальных процессора (28,3 млрд транзисторов), имеет энергопотребление ~ 450 Вт, в то же время человеческий мозг имеет порядка 86 млрд нейронов и при этом потребляет всего 20 Вт.

Предприняты значительные усилия для имитации синаптических функций с использованием различных электронных устройств. Перспективными являются мемристоры на основе энергонезависимой памяти. В цифровых схемах уже много лет в качестве таких устройств используются полевые транзисторы с плавающим затвором (Floating Gate, FG). Основное различие в устройстве между таким транзистором и полевым заключается в плавающем затворе. Различают двухтерминальные [1, 2] и трехтерминальные [3, 4] устройства. В трехтерминальных устройствах плавающий затвор располагается между управляющим электродом (затвором) и каналом и отделен от них диэлектрическими слоями. В зависимости от напряжения управляющего электрода на плавающий затвор из канала переходит положительный (дырки) или отрицательный (электроны) заряд и накапливается там. В двухтерминальных устройствах затвор отсутствует, а заряды туннелируют через слой диэлектрика и накапливаются в плавающем затворе из-за большой разности потенциалов между стоком и плавающим затвором. Заряд (операция стирания) удаляется путем облучения.

Традиционные устройства на основе кремниевых технологий характеризуются значительным рассеянием мощности. В работе [5] спрогнозировано, что масштабирование кремниевых транзисторов не удастся при длине затвора менее 5 нм из-за серьезных эффектов короткого канала [5]. Учитывая требуемую высокую плотность синапсов, традиционные устройства на основе кремния непригодны для нейроморфных приложений. В качестве альтернативы кремнию предлагается использовать некоторые слоистые полупроводники с атомарно-однородной толщиной вплоть до монослоя, более низкими диэлектрическими постоянными, большей шириной запрещенной зоны и эффективной массой носителей [5].

В настоящей работе рассматривается транзистор с плавающим затвором на основе ван-дер-ваальсового гетероперехода графен/h-BN/MoS_2. Строится многомасштабная математическая модель мемристора на основе транзистора с графеновым (Gr) плавающим затвором и TMD-каналом. Проводится симуляция работы устройства, в результате которой получены его основные характеристики. Описываются DFT-методы (Density Functional Theory, DFT), которые использованы при расчете физических характеристик материалов. Строится имитационная модель транзистора с плавающим затвором, основанная на модели полевого транзистора Шичмана – Ходжеса [6], представляющая собой упрощенный подход к анализу.

Вычислительные методы. Все расчеты, основанные на теории функционала плотности (DFT), проводились с применением пакета Quantum ATK [7]. Для вычислений использовался псевдопотенциал PseudoDojo [8] с базисными наборами в виде линейной комбинации атомных орбиталей. Обменно-корреляционный потенциал описывался приближением обобщенного градиента Пердью – Берка – Эрнцерхофа [9]

с поправками vdW, определяемыми методом Гримма DFT-D3 [10]. Оптимизация структур проводилась до тех пор, пока максимальная сила, действующая на каждый атом, не становилась меньше 0,01 эВ/Å, а максимальное изменение энергии между двумя этапами не становилось меньше 10^{-5} эВ. Во избежание взаимодействия между соседними слоями параметр ячейки в направлении, нормальном к листу, значительно превышал возможную длину связи (20 Å). Отсечение плотности сетки составляло 120 хартри (атомная единица энергии, или 1 хартри = 27,21 эВ). Для оптимизации структуры и расчета электронных и оптических свойств зону Бриллюэна разбивали на 15 × 15 × 1 и 25 × 25 × 1 *k*-точек соответственно. Кроме того, для более точного вычисления зонной структуры использовался экранированный гибридный функционал Хейда, Скусерии и Эрнцерхофа (HSE06) [11, 12].

Тензор диэлектрической восприимчивости $\chi_{ij}(\omega)$ получен с использованием формулы Кубо [7]. Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости имеет вид

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \chi(\omega).$$

Диэлектрическая проницаемость рассматриваемых материалов определяется действительной частью $\varepsilon(0)$. Термодинамическая работа выхода рассчитывалась как разность энергии, соответствующей уровню ваккуума E_{vac} (определялась из расчета электростатического потенциала), и уровня Ферми E_F:

$$\Phi = E_{vac} - E_F.$$

Подвижность носителей 2D-материалов равна:

$$\mu = \frac{e\hbar^3 C_s}{k_B T |m^*|^2 E_1^2},$$

где e – заряд электрона; $\hbar$ – приведенная постоянная Планка; C_s – жесткость в плоскости структуры; k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; m^* – эффективная масса носителей заряда в направлении переноса; $E_1 = \Delta V / (\Delta l / l_0)$ – деформационный потенциал; ΔV = 0,005 % – изменение энергии потолка валентной зоны для дырок и дна зоны проводимости для электронов, вызванных деформацией; l_0 – постоянная решетки в направлении транспорта носителей заряда; Δl – изменение l_0 при деформации.

Жесткость в плоскости структуры C_s равна:

$$(E - E_0)/S_0 = C_s (\Delta l / l_0)^2 / 2,$$

где E и S_0 – полная энергия и площадь оптимизированной ячейки соответственно.

Математическая модель устройства. ***Туннельный ток.*** Для получения представления об основных принципах работы устройства использовалась упрощенная эквивалентная схема (рис. 1). Геометрические параметры устройства следующие: длина канала L = 0,5 мкм, ширина W = 2,0 мкм, площадь h-BN S_2 = 100 мкм^2, толщина h-BN слоя между плавающим затвором и TMD-каналом d_1 = 5 нм, толщина h-BN слоя между плавающим затвором и управляющим электродом G d_2 = 280 нм, толщина монослоя графена h_{Gr} = 3,4 Å, толщина монослоя MoS_2 h_{TMD} = 6,5 Å. В транзисторе образуются следующие емкости: C_1 – между каналом и плавающим затвором, C_2 – между затвором G и плавающим затвором.

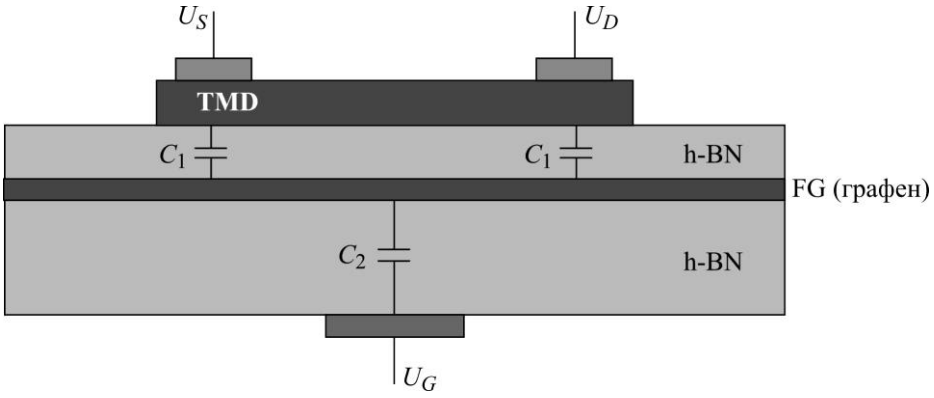


Рис. 1. Устройство транзистора с плавающим затвором (U_G, U_S и U_D – потенциалы затвора, истока и стока соответственно)
Fig. 1. Floating gate transistor design (U_G, U_S and U_D are the gate, source and drain potentials, respectively)

В зависимости от соотношения между напряжением на туннельном диэлектрике U_{tun} и высотой потенциального барьера ϕ_b различают туннелирование носителей заряда сквозь треугольный (туннелирование Фаулера – Нордгейма) и трапециевидный (прямое туннелирование) барьеры. Если $U_{tun} > \phi_b$, то барьер имеет треугольную форму, а туннельный ток через слой h-BN аппроксимируется уравнением Фаулера – Нордгейма

$$I_{tunFN} = \frac{S_1 e^3 m U_{tun}^2}{8\pi h \phi_b d_1^2 m^*} \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2m^*}\phi_b^{3/2} d_1}{3heU_{tun}} \right), \quad (1)$$

где S_1 – площадь TMD-канала; m – масса электрона; U_{tun} – напряжение на туннельном диэлектрике толщиной d_1; h – постоянная Планка; m^* – эффективная масса электрона в слое h-BN.

Трапециевидную форму барьер имеет при $U_{tun} < \phi_b$, а туннельный ток $I_{tun\,DT}$ (Direct Tunnelling – прямое туннелирование) определяется по формуле [13]

$$I_{tun\,DT} = \frac{S_1 e^3 m U_{tun}^2}{8\pi h \phi_b d_1^2 m^*} \left(\frac{\phi_b}{U_{tun}} \right) \left(\frac{2\phi_b}{U_{tun}} - 1 \right) \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2m^*}\phi_b^{3/2} d_1}{3heU_{tun}} \left[1 - \left(1 - \frac{\phi_b}{U_{tun}} \right)^{3/2} \right] \right). \quad (2)$$

Напряжение U_G делится между C_1 и C_2. При операции записи $U_G > 0$ и электроны с TMD-канала туннелируют на плавающий затвор, где накапливается отрицательный заряд Q_{FG}, а на туннельном диэлектрике конденсатора C_1 будет падать напряжение, равное [14]:

$$|U_{tun}| = \frac{C_2}{2C_1 + C_2} U_G + \frac{Q_{FG}}{2C_1 + C_2}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что рост $|U_{tun}|$ с увеличением U_G ограничивается зарядом Q_{FG}. Заряд, который накапливается за время действия записывающего импульса, равен:

$$Q_{FG} = \int_{t_1}^{t_2} I_{tun} dt,$$

где t_1 – начало действия импульса; t_2 – его окончание.

При операции стирания на управляющий электрод G подается отрицательное напряжение и накопленный отрицательный заряд уменьшается. В конце операции заряд плавающего затвора положительный. Напряжение на плавающем затворе в процессе заряда $U_{\text{FG}} = U_G - U_{tun}$.

Пороговое напряжение. Накопленный на плавающем затворе заряд сдвигает пороговое напряжение на величину

$$\Delta U_t = -\frac{Q_{\text{FG}}}{C_2}. \tag{4}$$

Со временем заряд Q_{FG} меняется в соответствии с выражением

$$\frac{dQ_{\text{FG}}}{dt} = I_{tun}. \tag{5}$$

Здесь туннельный ток I_{tun} определяется выражением (1) или (2).

Рассмотрим туннелирование Фаулера – Нордгейма. Используя уравнения (1), (3)–(5), получаем дифференциальное уравнение для U_t:

$$\frac{dU_t}{dt} = -\frac{\alpha}{d_1^2}\left(\frac{C_2}{2C_1 + C_2}\right)^2 (U_G - U_t)^2 \exp\left(-\frac{\beta d_1 (C_1 + C_2)}{C_2 (U_G - U_t)}\right),$$

где

$$\alpha = \frac{S_1 e^3 m}{8\pi h \phi_b m^*}, \quad \beta = \frac{8\pi\sqrt{2m^*}\phi_b^{3/2}}{3he}.$$

Полученное решение имеет вид

$$U_t = U_G - \frac{\beta d_1}{\frac{C_2}{2C_1 + C_2}\ln\left[\frac{\alpha\beta}{d_1(2C_1 + C_2)}t + \exp\left(\frac{\beta d_1 (2C_1 + C_2)}{C_2 (U_G - U_t(0))}\right)\right]},$$

где $U_t(0)$ – пороговое напряжение до подачи импульса записи на затвор.

Ток между стоком и истоком. Ток между стоком и истоком I_{DS} зависит от напряжения $U_{\text{FG}\,S} = U_{\text{FG}} - U_S$ между плавающим затвором и истоком. Различают три режима: допороговый, линейный и режим насыщения [6].

Для $U_{\text{FG}\,S} \le U_t$ (допороговая область)

$$I_{DS} = 0. \tag{6}$$

Если $U_{\text{FG}\,S} > U_t$, то линейный режим наблюдается при $U_{DS} < U_{\text{FG}\,S} - U_t$ и

$$I_{DS} = \mu_n C \frac{W}{L}\left[(U_{\text{FG}\,S} - U_t)U_{DS} - \frac{1}{2}U_{DS}^2\right], \tag{7}$$

где μ_n – подвижность электронов в слое MoS_2; C – емкость единицы площади туннельного диэлектрика.

Для режима насыщения $U_{DS} \geq U_{\mathrm{FG}\,S} - U_t$ и

$$I_{DS} = \mu_n \frac{CW}{2L}\left(U_{\mathrm{FG}\,S} - U_t\right)^2. \quad (8)$$

В уравнениях (7) и (8) учтена устойчивость транзисторов, изготовленных из 2D-TMD-кристаллов, к эффектам короткого канала [5, 15].

Результаты и их обсуждение. Приведем результаты DFT-расчетов параметров материалов для симуляции работы транзистора:

MoS_2

Ширина запрещенной зоны E_g ..... 2,14 эВ
Энергия сродства к электрону χ_{MoS_2} ..... 3,99 эВ
Термодинамическая работа выхода Φ_{MoS_2}..... 5,06 эВ
Подвижность μ_n .....130,05 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$
Эффективная масса электронов m^* 0,40m

h-BN

Ширина запрещенной зоны E_g ..... 5,85 эВ
Энергия сродства к электрону $\chi_{h\text{-}BN}$ ..... 1,81 эВ
Термодинамическая работа выхода $\Phi_{h\text{-}BN}$ ..... 4,74 эВ
Диэлектрическая проницаемость ε 6,90
Эффективная масса электронов m^* 0,24m

Вычислена термодинамическая работа выхода электронов для графена, которая составляет 4,25 эВ.

На рис. 2 показана зонная диаграмма устройства. Благодаря более высокому значению работы выхода MoS_2 электроны переходят из графена в дихалькогенид и сообщают ему отрицательный заряд, а графен накапливает положительный заряд. Обмен зарядами закончится, когда уровни Ферми выровняются. Выравнивание зон (проводимости и валентной) между слоями h-BN и MoS_2 будет определяться разницей в их сродстве к электрону: $\chi_{MoS_2} - \chi_{h\text{-}BN}$. В случае графена выравнивание будет определяться разницей между работой выхода графена и сродством к электрону h-BN: $\Phi_{Gr} - \chi_{h\text{-}BN}$.

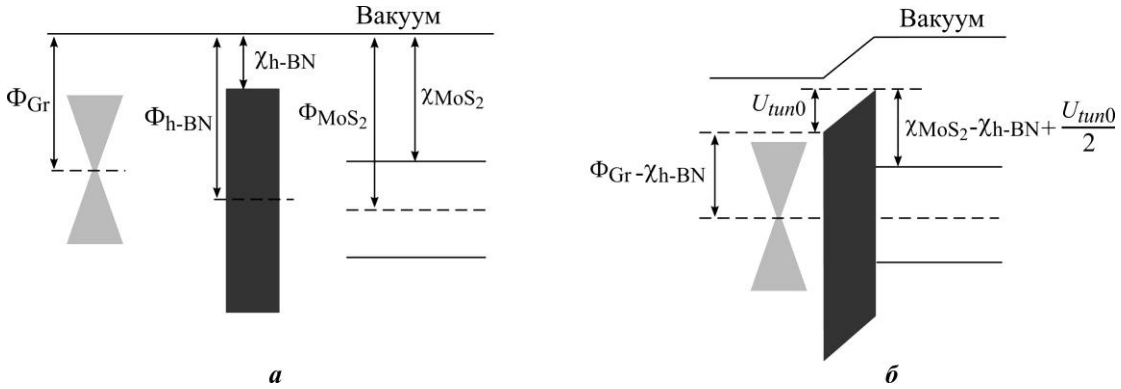


Рис. 2. Зонная диаграмма структуры графен/h-BN/MoS_2: *а* – до создания контакта; *б* – после создания контакта (пунктирная линия – уровень Ферми)
Fig. 2. Band diagram of graphene/h-BN/MoS_2 structure: *a* – before creating a contact; *b* – after creating a contact (the dotted line – the Fermi level)

Положение уровня Ферми в слое MoS_2 относительно минимума зоны проводимости контролируется напряжением затвора. Отметим, что согласование энергий уровня Ферми между графеном и слоем MoS_2 в равновесии требует смещения уровней вакуума по обеим сторонам барьера h-BN (см. рис. 2). В результате даже при нулевом приложенном смещении на слое h-BN между TMD-каналом и плавающим затвором образуется электрическое поле $E_{tun0} = U_{tun0}/d_1$, где U_{tun0} падение напряжения на диэлектрике при нулевом смещении. Сдвиг E_F в графене можно выразить как [4]

$$E_F = sign(n)\hbar v_F \sqrt{|n|},$$

где v_F – скорость Ферми.

Смещение уровня Ферми определяется половиной разницы работ выхода TMD-канала и графена: $\left(\Phi_{MoS_2} - \Phi_{Gr}\right)/2 = 0{,}4$ эВ. Таким образом, на плавающем затворе плотность избыточных дырок, которые создают положительный заряд $5{,}22\cdot10^{-15}$ Кл, равна $3{,}26\cdot10^{14}$ см$^{-2}$.

Высота потенциального барьера в слое MoS_2 составляет

$$\phi_b = \chi_{MoS_2} - \chi_{h\text{-}BN} + \frac{U_{tun0}}{2} = 2{,}29 \text{ В}.$$

Напряжение на плавающем затворе отлично от нуля и равно U_{FG} = 0,11 В, даже если на затворе нет смещения, а значение порогового напряжения $U_t(0)$, согласно (4), с полученным начальным зарядом равно –0,24 В.

На рис. 3 показаны результаты моделирования процесса зарядки туннельными электронами плавающего затвора в интервале 0–0,01 с. В процессе записи исток заземлен, а потенциал G выше потенциала стока. Перед зарядкой напряжение на плавающем затворе U_{FG} = 0,11 В. К затвору прикладывается положительное относительно стока смещение 3, 5, 7 и 9 В. Приложенное напряжение может приводить к изменению заряда плавающего затвора: сначала будет происходить компенсация положительного заряда, а затем рост отрицательного, что приведет к изменению напряжения U_{FG}. По истечении 0,01 с внешнее напряжение снимается и процесс зарядки завершается. Теперь заряд заперт в плавающем затворе, и его напряжение остается неизменным. На рис. 3 проиллюстрирован сдвиг U_t и заряд Q_{FG} плавающего затвора при изменении напряжения управляющего затвора U_G. С увеличением U_G скорость зарядки и максимальный накопленный заряд увеличиваются, что является логичным. Результаты расчета показывают, что время записи (время зарядки, за которое пороговое напряжение сдвигается на 1 В)

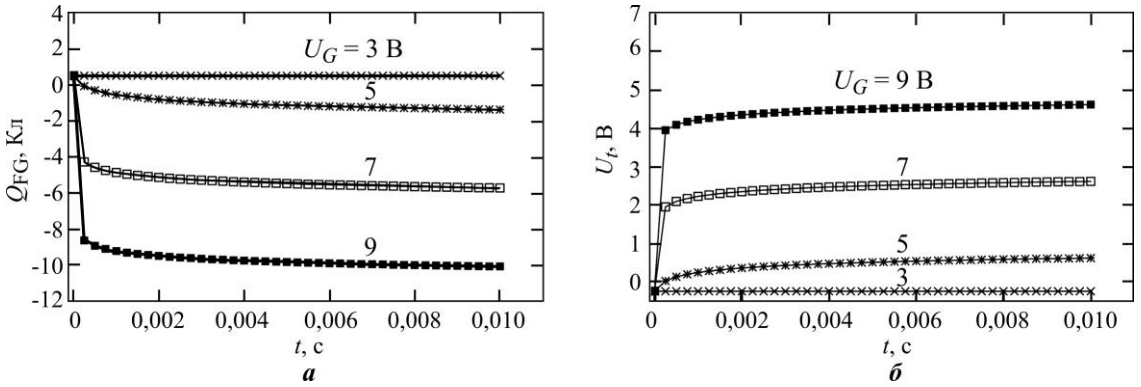


Рис. 3. Изменение заряда Q_{FG} плавающего затвора (*а*) и порогового напряжения U_t (*б*) в процессе зарядки

Fig. 3. Change in floating gate charge Q_{FG} (*a*) and threshold voltage U_t (*b*) during charging

при U_G = 5 В составляет порядка 380 мкс, при U_G = 9 В уменьшается до 50 нс. Отметим, что напряжение U_G = 3 В не меняет порогового значения напряжения и не приводит к зарядке плавающего затвора.

С использованием формул (6)–(8) построена ВАХ $I_{DS}(U_G)$ для напряжения U_{DS} = 0,01 В и разных интервалов U_G (рис. 4). Характеристика имеет вид гистерезиса. Пороговое напряжение ниже для прямой развертки и выше для обратной. Кроме того, ширина окна гистерезиса (окна памяти) зависит от диапазона развертки: постоянно увеличивается размер окна гистерезиса, определяемого разницей между пороговым напряжением для обратной и прямой разверток. Центр окна гистерезиса располагается при положительном напряжении затвора. Это связано с тем, что заряд на плавающем затворе отрицательный (электроны) [3].

Следующий численный эксперимент показывает возможность использования представленного устройства в качестве мемристора. Будем подавать на управляющий электрод G последовательность импульсов. Ток в TMD-канале постоянно увеличивается при подаче возбуждающего импульса высотой –6 В и длительностью 1 мс и уменьшается при подаче тормозного импульса 5 В и длительностью 10 мкс (рис. 5). Видно, что уже после 10 импульсов проводимость канала близка к состоянию насыщения. Такое изменение проводимости канала аналогично поведению биологических синапсов, где использование возбуждающего или тормозящего пресинаптического импульса приводит соответственно к увеличению или уменьшению проводимости синапса.

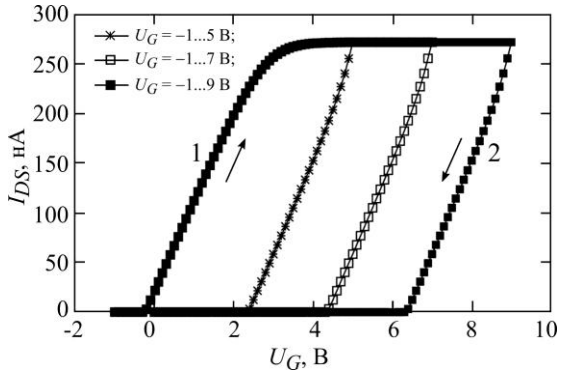


Рис. 4. Зависимость тока между стоком и истоком I_{DS} от напряжения на управляющем затворе U_G: участок 1 – операция стирания; участок 2 – операция записи

Fig. 4. Drain-source current I_{DS} dependence of control gate voltage U_G: stage 1 – erase operation; stage 2 – write operation

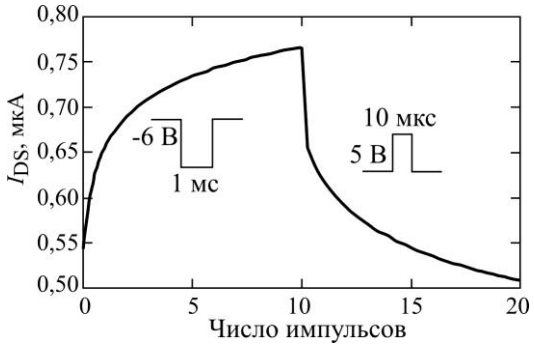


Рис. 5. Изменение проводимости канала при множественных импульсах потенцирования и депрессии (на вставках – характеристики импульсов)

Fig. 5. Change in channel conductance during multiple potentiation and depression pulses (pulse characteristics are given in the insets)

Синаптическая пластичность (линейность, соотношение включение / выключение и количество аналоговых состояний) может настраиваться амплитудой импульса и его длительностью. Так, например, при увеличении длительности импульса можно прийти к насыщению проводимости и, наоборот, при уменьшении длительности можно выйти на линейный режим, когда проводимость меняется практически линейно.

Заключение. Результаты моделирования показывают, что транзистор с плавающим затвором на основе структуры графен/h-BN/MoS_2 может накапливать заряд. Время зарядки (записи) при U_G = 9 В составляет всего 50 нс, что говорит о высоком быстродействии устройства. Окно памяти может быть настроено изменением диапазона развертки U_G. Кроме того, устройству присуща пластичность, которая выражается в возможности настройки проводимости канала, что важно для процесса обучения и при использовании его в качестве мемристора.

Литература

1. Two-terminal floating-gate memory with van der Waals heterostructures for ultrahigh on/off ratio / ***Q. A. Vu, Y. S. Shin, Y. R. Kim et al.*** // Nat. Commun. 2016. Vol. 7. Art. No. 12725. https://doi.org/10.1038/ncomms12725

2. A reliable all-2D materials artificial synapse for high energy-efficient neuromorphic computing / ***J. Tang, C. He, J. S. Tang et al.*** // Adv. Funct. Mater. 2021. Vol. 31. Iss. 27. Art. No. 2011083. https://doi.org/10.1002/adfm.202011083

3. A high-performance MoS_2 synaptic device with floating gate engineering for neuromorphic computing / ***P. Tathagata, A. Tanweer, K. T. Krishna et al.*** // 2D Mater. 2019. Vol. 6. No. 4. Art. No. 045008. https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab23ba

4. Controlled charge trapping by molybdenum disulphide and graphene in ultrathin heterostructured memory devices / ***M. Sup Choi, G.-H. Lee, Y.-J. Yu et al.*** // Nat. Commun. 2013. Vol. 4. Art. No. 1624. https://doi.org/10.1038/ncomms2652

5. MoS_2 transistors with 1-nanometer gate lengths / ***S. B. Desai, S. R. Madhvapathy, A. B. Sachid et al.*** // Science. 2016. Vol. 354. P. 99–102. https://doi.org/10.1126/science.aah4698

6. ***Zhang C., Hasan S. M. R.*** A new floating-gate MOSFET model for analog circuit simulation and design // Analog Integr. Circ. Sig. Process. 2018. Vol. 101. P. 1–11. https://doi.org/10.1007/s10470-018-1374-3

7. QuantumATK: an integrated platform of electronic and atomic-scale modelling tools / ***S. Smidstrup, T. Markussen, P. Vancraeyveld et al.*** // J. Phys.: Condens. Matter. 2019. Vol. 32. No. 1. Art. No. 015901. https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007

8. The PseudoDojo: Training and grading a 85 element optimized norm-conserving pseudopotential table / ***M. J. van Setten, M. Giantomassi, E. Bousquet et al.*** // Comput. Phys. Commun. 2018. Vol. 226. P. 39–54. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.01.012

9. ***Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M.*** Generalized gradient approximation made simple // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. P. 3865–3868. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865

10. ***Grimme S., Antony J., Ehrlich S., Krieg H.*** A consistent and accurate ab initio parametrization of density functional dispersion correction (DFT-D) for the 94 elements H-Pu // J. Chem. Phys. 2010. Vol. 132. Iss. 15. Art. No. 154104. https://doi.org/10.1063/1.3382344

11. ***Heyd J., Scuseria G. E., Ernzerhof M.*** Hybrid functionals based on a screened Coulomb potential // J. Chem. Phys. 2003. Vol. 118. Iss. 18. P. 8207–8215. https://doi.org/10.1063/1.1564060

12. ***Heyd J., Scuseria G. E., Ernzerhof M.*** Erratum: “Hybrid functionals based on a screened Coulomb potential” [J. Chem. Phys. 118, 8207 (2003)] // J. Chem. Phys. 2006. Vol. 124. Iss. 21. Art. No. 219906. https://doi.org/10.1063/1.2204597

13. ***Schuegraf K. F., Hu C.*** Hole injection SiO /sub 2/ breakdown model for very low voltage lifetime extrapolation // IEEE Transactions on Electron Devices. 1994. Vol. 41. Iss. 5. P. 761–767. https://doi.org/10.1109/16.285029

14. ***Kolodny A., Nieh S. T. K., Eitan B., Shappir J.*** Analysis and modeling of floating-gate EEPROM cells // IEEE Transactions on Electron Devices. 1986. Vol. 33. Iss. 6. P. 835–844. https://doi.org/10.1109/T-ED.1986.22576

15. ***Liu H., Neal A. T., Ye P. D.*** Channel length scaling of MoS_2 MOSFETs // ACS Nano. 2012. Vol. 6. Iss. 10. P. 8563–8569. https://doi.org/10.1021/nn303513c

Статья поступила в редакцию 01.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 18.12.2023 г.; принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторе

Мефтахутдинов Руслан Максутович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории диффузионных процессов Научно-исследовательского института им. С. П. Капицы Ульяновского государственного университета (Россия, 432700, г. Ульяновск ул. Льва Толстого, 42), старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мемристивных систем на основе самоорганизованных структур НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), postbox.mrm@gmail.com

References

1. Vu Q. A., Shin Y. S., Kim Y. R., Nguyen V. L., Kang W. T., Kim H., Luong D. H., Lee I. M. et al. Two-terminal floating-gate memory with van der Waals heterostructures for ultrahigh on/off ratio. *Nat. Commun.*, 2016, vol. 7, art. no. 12725. https://doi.org/10.1038/ncomms12725

2. Tang J., He C., Tang J. S., Yue K., Zhang Q., Liu Y., Wang Q., Wang S. P. et al. A reliable all-2D materials artificial synapse for high energy-efficient neuromorphic computing. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, vol. 31, iss. 27, art. no. 2011083. https://doi.org/10.1002/adfm.202011083

3. Tathagata P., Tanweer A., Krishna K. T., Chetan S. T., Arindam G. A high-performance MoS_2 synaptic device with floating gate engineering for neuromorphic computing. *2D Mater.*, 2019, vol. 6, no. 4, art. no. 045008. https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab23ba

4. Sup Choi M., Lee G.-H., Yu Y.-J., Lee D.-Y., Lee S. H., Kim P., Hone J., Yoo W. J. Controlled charge trapping by molybdenum disulphide and graphene in ultrathin heterostructured memory devices. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, art. no. 1624. https://doi.org/10.1038/ncomms2652

5. Desai S. B., Madhvapathy S. R., Sachid A. B., Llinas J. P., Wang Q., Ahn G. H., Pitner G., Kim M. J. et al. MoS_2 transistors with 1-nanometer gate lengths. *Science*, 2016, vol. 354, pp. 99–102. https://doi.org/10.1126/science.aah4698

6. Zhang C., Hasan S. M. R. A new floating-gate MOSFET model for analog circuit simulation and design. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.*, 2018, vol. 101, pp. 1–11. https://doi.org/10.1007/s10470-018-1374-3

7. Smidstrup S., Markussen T., Vancraeyveld P., Wellendorff J., Schneider J., Gunst T., Verstichel B., Stradi D. et al. QuantumATK: an integrated platform of electronic and atomic-scale modelling tools. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2019, vol. 32, no. 1, art. no. 015901. https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007

8. Van Setten M. J., Giantomassi M., Bousquet E., Verstraete M. J., Hamann D. R., Gonze X., Rignanese G.-M. The PseudoDojo: Training and grading a 85 element optimized norm-conserving pseudopotential table. *Comput. Phys. Commun.*, 2018, vol. 226, pp. 39–54. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.01.012

9. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 77, pp. 3865–3868. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865

10. Grimme S., Antony J., Ehrlich S., Krieg H. A consistent and accurate ab initio parametrization of density functional dispersion correction (DFT-D) for the 94 elements H-Pu. *J. Chem. Phys.*, 2010, vol. 132, iss. 15, art. no. 154104. https://doi.org/10.1063/1.3382344

11. Heyd J., Scuseria G. E., Ernzerhof M. Hybrid functionals based on a screened Coulomb potential. *J. Chem. Phys.*, 2003, vol. 118, iss. 18, pp. 8207–8215. https://doi.org/10.1063/1.1564060

12. Heyd J., Scuseria G. E., Ernzerhof M. Erratum: “Hybrid functionals based on a screened Coulomb potential” [J. Chem. Phys. 118, 8207 (2003)]. *J. Chem. Phys.*, 2006, vol. 124, iss. 21, art. no. 219906. https://doi.org/10.1063/1.2204597

13. Schuegraf K. F., Hu C. Hole injection SiO /sub 2/ breakdown model for very low voltage lifetime extrapolation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1994, vol. 41, iss. 5, pp. 761–767. https://doi.org/10.1109/16.285029

14. Kolodny A., Nieh S. T. K., Eitan B., Shappir J. Analysis and modeling of floating-gate EEPROM cells. *Transactions on Electron Devices*, 1986, vol. 33, iss. 6, pp. 835–844. https://doi.org/10.1109/T-ED.1986.22576

15. Liu H., Neal A. T., Ye P. D. Channel length scaling of MoS_2 MOSFETs. *ACS Nano*, 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 8563–8569. https://doi.org/10.1021/nn303513c

The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 18.12.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the author

Ruslan M. Meftakhutdinov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher of the Laboratory of Diffusion Processes, S. P. Kapitsa Scientific Research Institute, Ulyanovsk State University (Russia, 432700, Ulyanovsk, Leo Tolstoy st., 42), Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Memristive Systems Based on Self-Organized Structures, SMC “Technological Center” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), postbox.mrm@gmail.com

Научная статья
УДК 621.382.3
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-489-503
EDN: DWGUPK

TCAD-моделирование транзистора со статической индукцией

Ю. Н. Максименко[1], К. О. Петросянц[2,3], Д. С. Силкин[2], В. К. Грабежова[1]

[1]ООО «Дизайн-центр биомикроэлектронных технологий "Вега"», г. Новосибирск, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия
[3]Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия

violamaksimenko@yandex.ru

Аннотация. Мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией КП926 способен работать как в полевом, так и в биполярном режимах одновременно. Такой режим работы обеспечивает высокие ключевые характеристики. Однако анализ конструкции транзистора КП926 показал, что она далеко не оптимальна. В работе для определения оптимальных конструктивных и электрофизических параметров прибора предложена физико-математическая TCAD-модель транзистора со статической индукцией. С помощью данной модели проведен анализ влияния конструктивных и электрофизических параметров на основные электрические характеристики транзистора типа КП926 при работе в биполярном режиме. Определены оптимальные значения данных параметров, которые позволят при их реализации улучшить более чем в два раза такие основные электрические характеристики транзистора, как коэффициент усиления по току, сопротивление канала в открытом состоянии, быстродействие.

Ключевые слова: транзистор со статической индукцией, физико-математическая модель, сопротивление транзистора в открытом состоянии

Для цитирования: Максименко Ю. Н., Петросянц К. О., Силкин Д. С., Грабежова В. К. TCAD-моделирование транзистора со статической индукцией // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 489–503. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-489-503. – EDN: DWGUPK.

© Ю. Н. Максименко, К. О. Петросянц, Д. С. Силкин, В. К. Грабежова, 2024

Original article

TCAD simulation of a static induction transistor

Yu. N. Maksimenko[1], K. O. Petrosyants[2,3], D. S. Silkin[2], V. K. Grabezhova[1]

[1]*Vega Bio Microelectronic Technology Design Center LLC, Novosibirsk, Russia*
[2]*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*
[3]*Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

violamaksimenko@yandex.ru

Abstract. The high-power high-voltage static induction transistor KP926 is capable of operating in both field and bipolar modes simultaneously. This operation mode provides high key characteristics. However, an analysis of the KP926 transistor design showed that it is far from optimal. In this work, to determine the optimal design and physical parameters of the device, a physical and mathematical TCAD model of a static induction transistor is proposed. Using this model, the analysis was carried out of design and physical parameters effect on the basic electrical performance of a KP926 type transistor when operating in bipolar mode. Optimal values of these parameters have been determined that will allow, when implemented, more than twofold improvement of basic electrical performance of the transistor (current gain, channel opened impedance, operational speed).

Keywords: static induction transistor, physical and mathematical model, transistor opened impedance

For citation: Maksimenko Yu. N., Petrosyants K. O., Silkin D. S., Grabezhova V. K. TCAD simulation of a static induction transistor. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 489–503. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-489-503. – EDN: DWGUPK.

Введение. Транзисторы со статической индукцией – тип вертикальных транзисторов, имеющих признаки как полевого, так и биполярного приборов. Запирание тока происходит за счет расширения обедненной области при приложении обратного смещения к затворному *p*–*n*-переходу, в то время как переход транзистора в открытое состояние осуществляется подачей через затворный *p*–*n*-переход прямого тока. Инжекция носителей в канал приводит к уменьшению сопротивления канала до уровня ~ 1 мОм. Эти особенности позволяют добиться низких потерь и рабочих частот ~ 1 МГц при управлении токами в несколько десятков ампер. Ключи с такими параметрами крайне востребованы в схемах питания мощных электродвигателей, системах ускоренной зарядки электромобилей и т. п., где важно получить оптимальное соотношение высокой управляемой мощности и частоты работы устройства. Сравнительный анализ показывает, что по сопротивлению открытого канала приборы со статической индукцией превосходят многие типы силовых ключей, в том числе биполярные транзисторы с изолированным затвором [1]. Этим обусловлены меньшие потери мощности и повышенная энергоэффективность данных приборов [2].

В настоящей работе рассматривается физико-математическая модель, позволяющая проводить расчет основных ВАХ приборов со статической индукцией для биполярного режима работы.

Обзор литературных источников. Теоретический анализ физических процессов в приборах со статической индукцией и разработка моделей, устанавливающих связь конструктивных и электрофизических параметров структуры с ее электрическими характеристиками, проводились практически одновременно с их появлением. Построение физико-математических моделей полупроводниковых приборов является важной задачей, так как их наличие ускоряет процесс разработки прибора и дает более правильное понимание зависимости основных ВАХ от конструктивных и электрофизических параметров структуры.

Исследование приборов со статической индукцией чаще происходит экспериментальными методами [3–5]. Разработке физико-математических моделей приборов со статической индукцией посвящено относительно небольшое количество работ [6–10]. При этом в большинстве из них основное внимание уделено рассмотрению только стационарных процессов в полевом режиме работы прибора. Для разработки физико-математической модели, адекватно описывающей процессы токопереноса в структуре прибора, требуется математически сложный количественный анализ в простейшем случае двухмерной картины распределения электрического поля, потенциала и плотности тока в областях прибора, имеющих довольно сложную форму. Усугубляет трудность создания физико-математической модели приборов со статической индукцией и нелинейная зависимость электрофизических параметров материала областей структуры от электрических режимов на электродах прибора. Это относится, в частности, к зависимости подвижности основных носителей заряда в канале структуры от напряженности электрического поля в нем. Решить такую проблему может TCAD-моделирование, однако работы в этой области достаточно редки [11–13] и не дают комплексного анализа влияния параметров структуры на характеристики транзистора.

В 1990 г. был разработан высоковольтный транзистор со статической индукцией КП926 с планарным затвором [14], работающий как в полевом, так и в биполярном режимах. Для расчета его ВАХ физико-математические модели, описанные в работах [6–10], неприменимы. В работах [15–17] проведено детальное исследование технологии и конструкции транзистора КП926 и предложен ряд решений, существенно улучшающих основные характеристики прибора. Однако для более глубокого понимания влияния на основные характеристики прибора его конструктивных и электрофизических параметров необходима физико-математическая модель, так как экспериментальные исследования очень длительные и требуют больших финансовых затрат.

Разработка физико-математической модели прибора со статической индукцией. В качестве исходных данных использовали структуру кристалла транзистора КП926 (рис. 1). Выходные характеристики данного прибора приведены на рис. 2.

Модель выполнена в двухмерном представлении с применением системы приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD, где значение третьей координаты принимается равным 1 мкм и может быть увеличено заданием коэффициента площади (AreaFactor). Моделируемая структура представлена на рис. 3.

Параметры моделируемой структуры, для которых получены графики (рис. 4), следующие (боковая диффузия равна 0,8 от глубины залегания примеси):

Толщина подложки ..... 200 мкм
Толщина базового слоя до термических обработок ..... 45 мкм
Толщина базового эпитаксиального слоя
после всех термических операций ..... 38 мкм
Толщина оксида кремния ..... 0,9 мкм
Ширина окна под исток ..... от 1 до 2 мкм
Полная ширина элементарной ячейки..... 16,4 мкм
Длина элементарной ячейки..... 242 мкм
Количество элементарных ячеек ..... 5100 шт.
Ширина затворных p^+-слоев (без учета боковой диффузии)
в модели ..... 2,4 мкм
Глубина залегания затворных p^+-слоев..... 4,8 мкм
Глубина залегания n^+-слоя под исток..... 1,1 мкм
Поверхностная концентрация примеси p+-слоев..... $4 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$
Поверхностная концентрация n+-слоя ..... $1{,}7 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$
Концентрация примеси в эпитаксиальной области ..... $4 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$
Концентрация примеси в подложке ..... $5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$

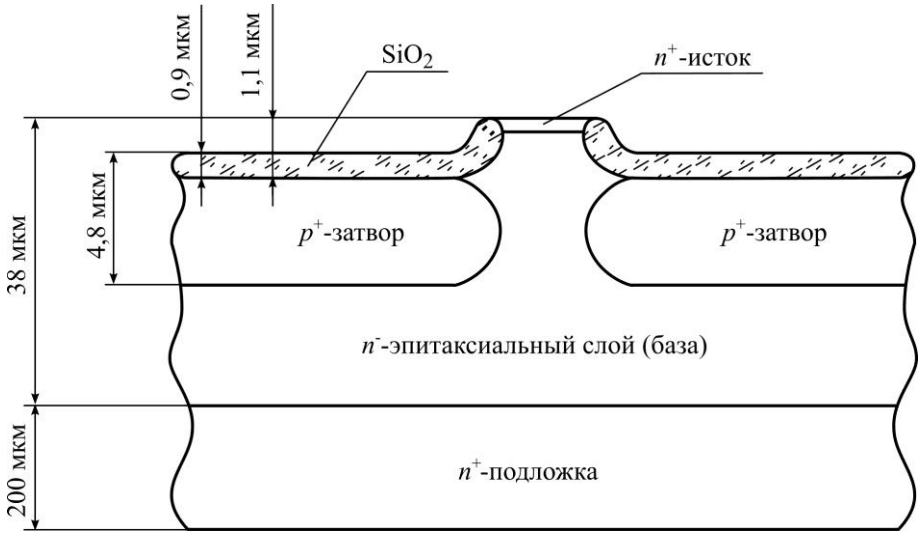


Рис. 1. Структура кристалла транзистора КП926
Fig. 1. Crystal structure of the KP926 transistor

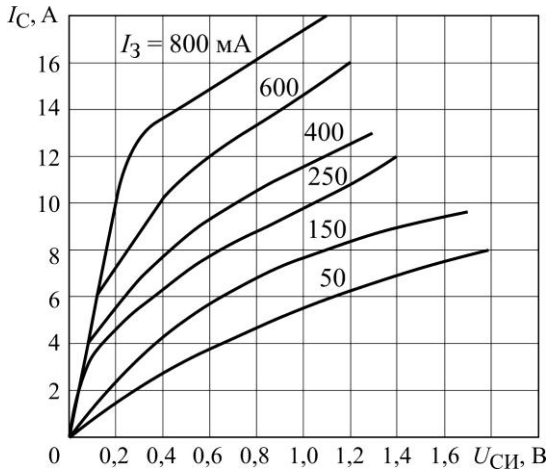


Рис. 2. Выходные характеристики транзистора КП926
Fig. 2. Output characteristics of the KP926 transistor

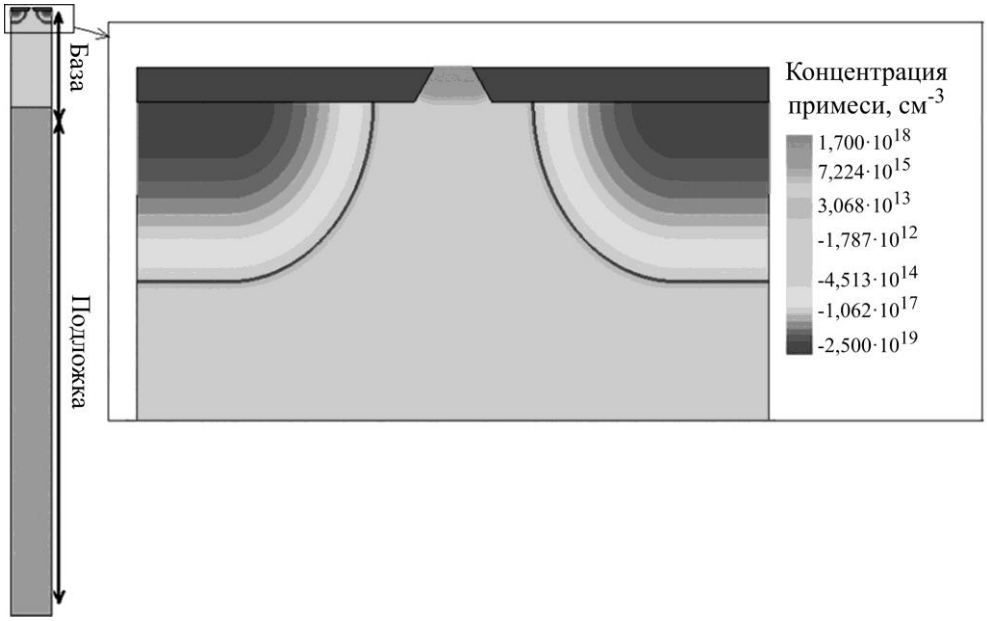


Рис. 3. Модель структуры транзистора КП926
Fig. 3. KP926 transistor structure model

В данном случае коэффициент площади равен длине канала в микрометрах, AreaFactor для транзистора КП926 равен произведению длины одного элементарного канала на их количество (242·5100 = = 1 234 200 мкм).

При моделировании применяли стандартный набор моделей для приборов, основанных на работе *p*–*n*-перехода: модель подвижности носителей заряда с учетом зависимости подвижности от концентрации носителей в области; модели Шокли – Рида – Холла и Оже для рекомбинации; модель насыщения подвижности в сильном поле. Эти модели стандартно используются при TCAD-моделировании силовых биполярных приборов [18].

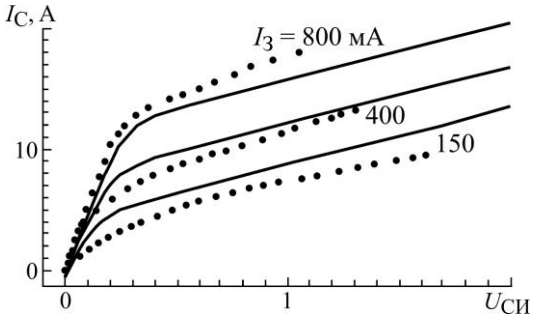


Рис. 4. Сравнение экспериментальных характеристик (• • •) для разных токов затвора с результатами TCAD-моделирования (———)
Fig. 4. Comparison of experimental characteristics (• • •) for different gate currents with TCAD simulation results (———)

Для сравнения экспериментальных выходных характеристик с результатами моделирования (см. рис. 4) оцифрованы графики для токов затвора 150, 400, 800 мА (см. рис. 2). Отклонение результатов моделирования от эксперимента находится в пределах 20 %.

Исследование модели транзистора со статической индукцией. В структуре транзистора со статической индукцией отсутствуют *p*–*n*-переходы на пути протекания тока между стоком и истоком. Запирание тока происходит путем подачи обратного напряжения на затвор. При этом в слаболегированной базовой области начинает распространяться электрическое поле, перпендикулярное направлению движения электронов между стоком и истоком. Это поле препятствует возникновению тока стока I_C при обратном смещении на затворе. Условием успешного запирания тока является распространение поля на всю ширину канала (рис. 5).

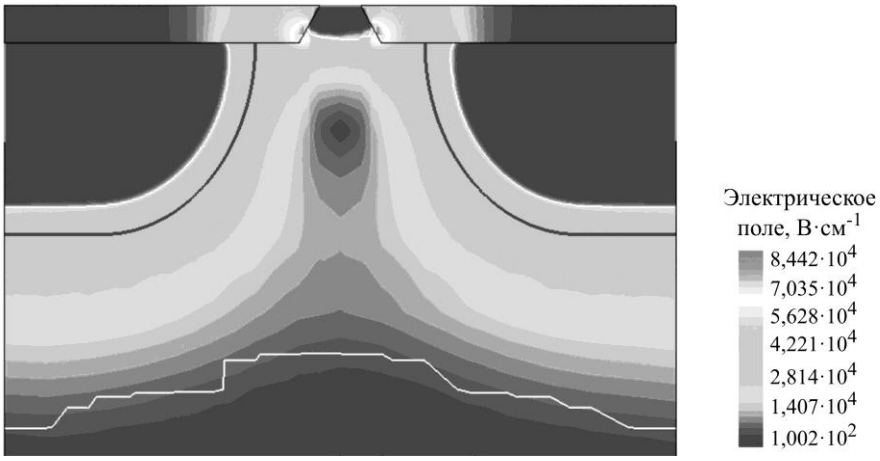


Рис. 5. Распределение электрического поля в структуре транзистора КП926 при обратном смещении затворного *p*–*n*-перехода
Fig. 5. Distribution of the electric field in the structure of the KP926 transistor with the reverse displacement of the gate *p*–*n* junction

При отсутствии обратного смещения на затворном *p*–*n*-переходе ток в цепи сток – исток протекает свободно, внутреннее сопротивление транзисторной структуры складывается из сопротивлений слаболегированной базовой области и сильнолегированных подложки и n^+-слоя истока. При подаче прямого тока затвора $I_З$ плотность объемного заряда в базе, определяющая значение сопротивления этой области, складывается из концентраций легирования базы и избыточных носителей, попавших туда вместе с током затвора. Изменение концентрации электронов N_e в базовой области в зависимости от тока затвора показано на рис. 6.

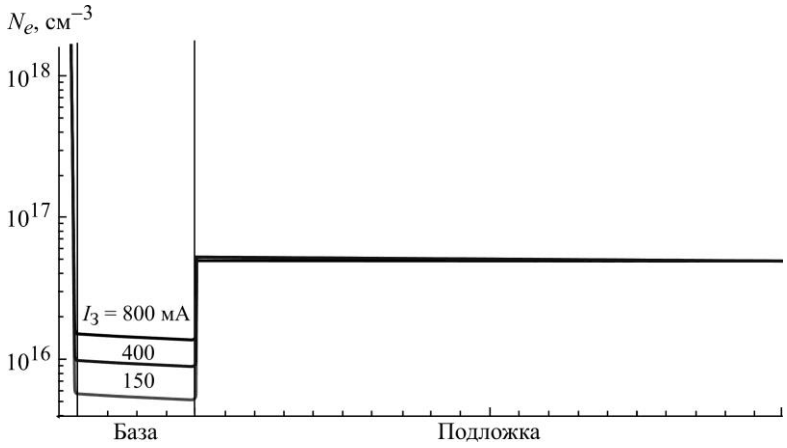
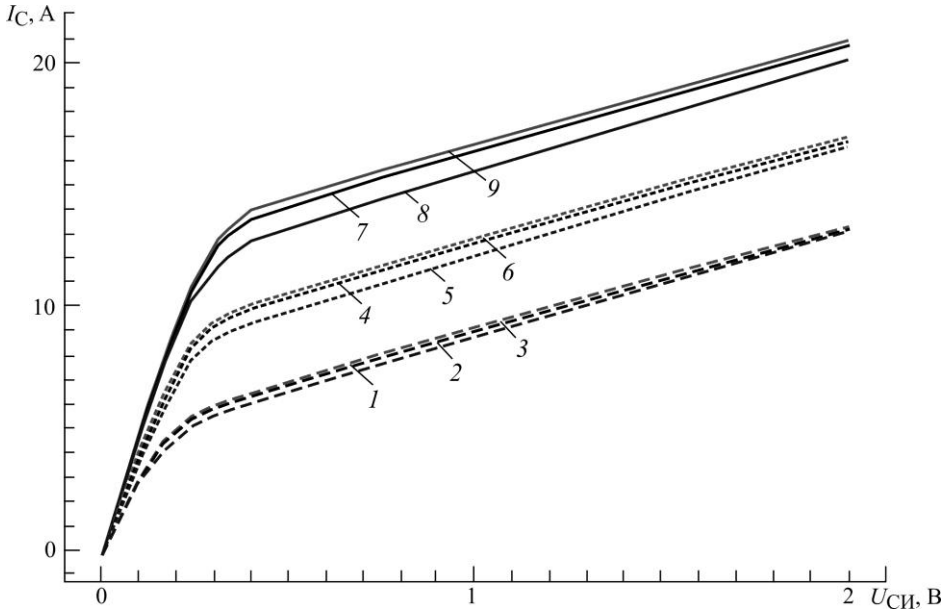


Рис. 6. Распределение электронов между стоком и истоком в зависимости от тока затвора $I_З$ ($I_С = 0$)
Fig. 6. Electron distribution between the drain and the source depending on the gate current (the drain current is zero)

При протекании тока затвора через базовую область в ней накапливается заряд, определяемый током. Распределяясь по объему базовой области, накопленный заряд вызывает снижение сопротивления. Изменение внутреннего сопротивления транзистора при подаче разных значений прямого тока затвора определяет его коэффициент усиления. При работе транзистора в биполярном режиме ток затвора концентрируется главным образом в районе между p^+-слоями, поэтому параметры легирования в этой области оказывают наибольшее влияние на коэффициент усиления транзистора.

Выходные характеристики при различных значениях поверхностной концентрации N_{p+} примеси в p^+-слое представлены на рис. 7. С ростом концентрации примеси в p^+-слое происходит увеличение коэффициента усиления транзистора, что связано с повышением коэффициента инжекции затворного p^+–n-перехода. Чем меньше коэффициент инжекции, тем больше электронов в виде электронного тока проникает в p^+-область, не задерживаясь в эпитаксиальной n-области и не уменьшая тем самым ее сопротивление. В пользу этого говорит также то, что по мере роста концентрации в p^+-слое увеличение коэффициента усиления замедляется (чем ближе коэффициент инжекции к единице, тем менее значительно влияние данного параметра).



1 – idvd_lg150m_Npplus4e19; *2* – idvd_lg150m_Npplus2e19; *3* – idvd_lg150m_Npplus6e19; *4* – idvd_lg400m_Npplus4e19; *5* – idvd_lg400m_Npplus2e19; *6* – idvd_lg400m_Npplus6e19; *7* – idvd_lg800m_Npplus4e19; *8* – idvd_lg800m_Npplus2e19; *9* – idvd_lg800m_Npplus6e19

Рис. 7. Влияние поверхностной концентрации p^+-слоя на выходные характеристики транзистора КП926
Fig. 7. Impact of the surface concentration of the p^+ layer on the output characteristics of the KP926 transistor

Увеличению коэффициента усиления также способствует рост глубины залегания n^+-слоя истока. Чем глубже проникает n^+-слой, тем меньше объем слаболегированной базы, сопротивление которой нужно уменьшить с помощью тока затвора. Следовательно, при той же величине заряда, вносимого током затвора, сопротивление канала уменьшается сильнее. Однако увеличение глубины залегания n^+-слоя негативно сказывается на запирающих свойствах транзистора. Во-первых, в n^+-слой не проникает электрическое поле (рис. 8). Смыкание электрических полей от затворных p^+–n-переходов происходит под n^+-слоем, где у p^+-областей начинается искривление. Для того чтобы запереть электрический ток, область пространственного заряда должна распространяться дальше, так как ширина «канала» между двумя p^+-областями растет. Для достижения ширины области пространственного заряда, требуемой для закрывания транзистора, необходимо более высокое обратное напряжение. Моделирование показывает, что для запирания структуры, изображенной на рис. 8, требуется подать на затвор отрицательное напряжение на 2 В больше, чем для структуры, изображенной на рис. 5.

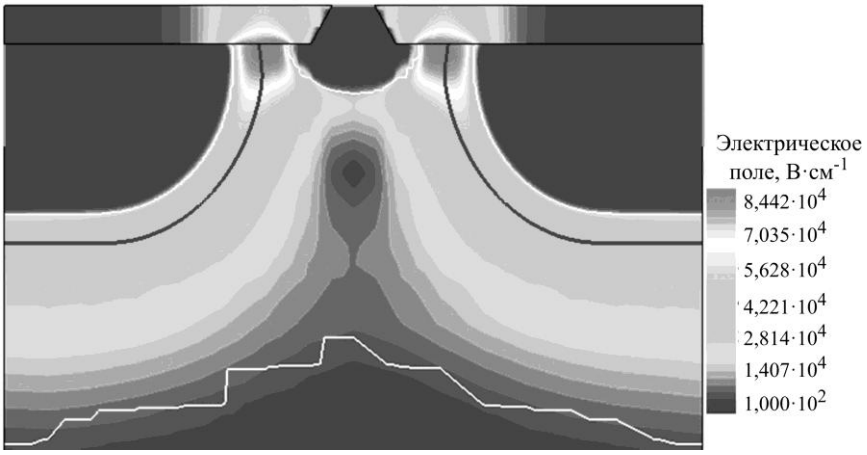
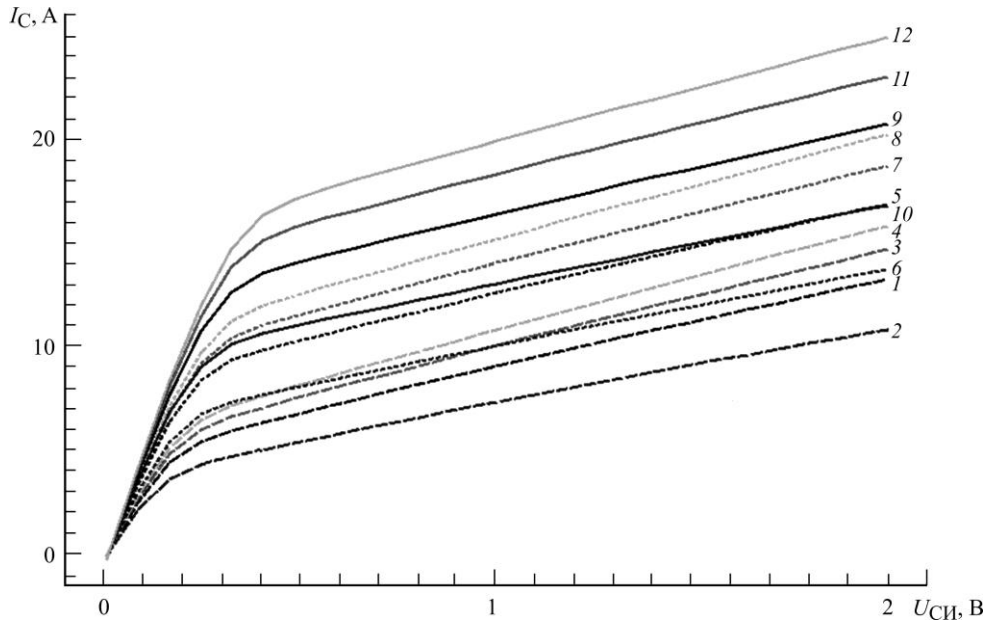


Рис. 8. Распределение электрического поля в структуре при обратном смещении затворного *p*–*n*-перехода в случае, когда n^+-область примыкает к p^+-области
Fig. 8. Distribution of the electric field in the structure with the reverse displacement of the gate *p*–*n* junction in the case when the n^+ region is adjacent to the p^+ region

У поверхности структуры может образоваться n^+–p^+-переход, имеющий низкое напряжение лавинного пробоя. Это напряжение будет определять пробой по затвору всего транзистора. Из рис. 8 видно, что максимальная напряженность поля возникает не только в диэлектрике, способном выдерживать высокие значения напряженности, но и в полупроводнике на границе p^+- и n^+-областей.

Моделирование показывает, что глубина залегания n^+-слоя истока должна совпадать или быть чуть больше толщины оксида, чтобы не оказывать негативного влияния ни на коэффициент усиления, ни на запирающие свойства транзистора. Влияние глубины залегания n^+-слоя на выходные характеристики продемонстрировано на рис. 9.



1 – idvd_lg150m_Hn1.1u; *2* – idvd_lg150m_Hn0.5u; *3* – idvd_lg150m_Hn1.7u; *4* – idvd_lg150m_Hn2.5u; *5* – idvd_lg400m_Hn1.1u; *6* – idvd_lg400m_Hn0.5u; *7* – idvd_lg400m_Hn1.7u; *8* – idvd_lg400m_Hn2.5u; *9* – idvd_lg800m_Hn1.1u; *10* – idvd_lg800m_Hn0.5u; *11* – idvd_lg800m_Hn1.7u; *12* – idvd_lg800m_Hn2.5u

Рис. 9. Влияние глубины залегания n^+-слоя на выходные характеристики транзистора КП926
Fig. 9. Impact of the depth of the n^+ layer on the output characteristics of the KP926 transistor

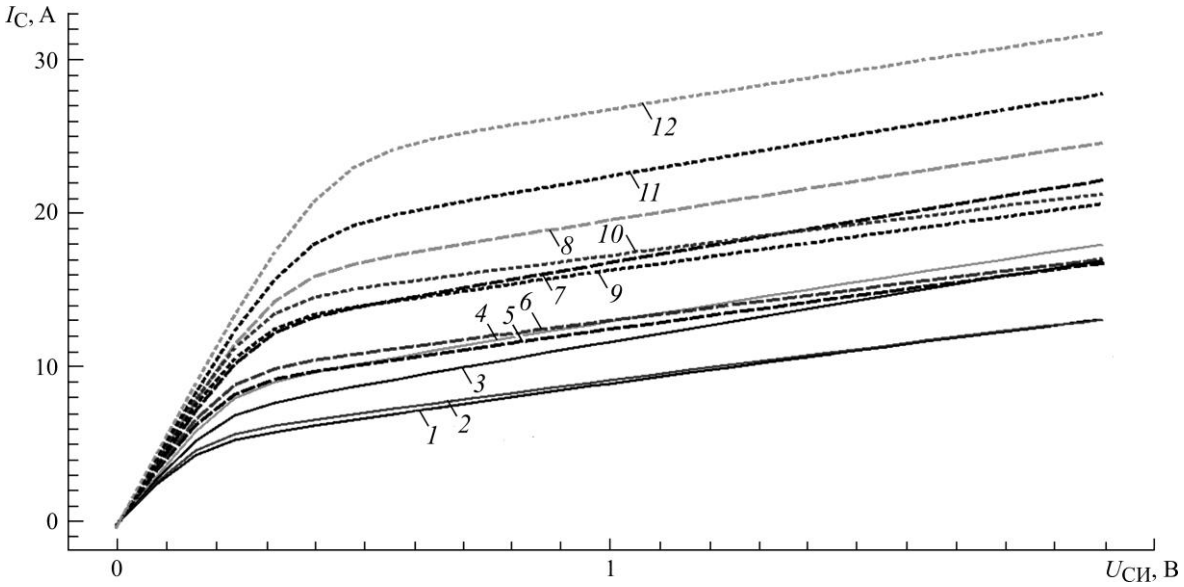
Из рис. 9 видно, что при глубине залегания меньше толщины диэлектрика (H_n = 0,5 мкм) не только уменьшается коэффициент усиления, но и растет внутреннее сопротивление открытого транзистора. Это выражается в уменьшении наклона выходных характеристик. Наклон выходных характеристик при глубинах залегания n^+-слоя больше толщины диэлектрика (H_n > 0,9 мкм) и сохраняется почти неизменным. Это говорит о том, что дополнительное сопротивление возникает именно в «горлышке» истока.

Зависимость коэффициента усиления по току от глубины залегания n^+-слоя имеет вид:

Глубина залегания n^+-слоя, мкм	0,5	1,1	1,7	2,5
Коэффициент усиления по току	21	26	29	31

Коэффициент усиления по току здесь и далее рассчитывали как отношение I_C при U_C = 2 В к $I_З$ = 800 мА.

С ростом тока затвора коэффициент усиления по току уменьшается и будет стремиться к единице, когда все электроны выйдут из истока (их плотность составит $1{,}7 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$). Для увеличения коэффициента усиления по току и снижения сопротивления канала необходимо увеличивать концентрацию примесей как в истоке, так и в затворе. На рис. 10 приведены результаты расчета ВАХ транзистора со статической индукцией при различных значениях примесей в истоке и затворе.



1 – KP926_lg150m_Pplus4e19_Nplus1.7e18; *2* – KP926_lg150m_Pplus4e20_Nplus1.7e18;
3 – KP926_lg150m_Pplus4e19_Nplus1.7e19; *4* – KP926_lg150m_Pplus4e20_Nplus1.7e19;
5 – KP926_lg400m_Pplus4e19_Nplus1.7e18; *6* – KP926_lg400m_Pplus4e20_Nplus1.7e18;
7 – KP926_lg400m_Pplus4e19_Nplus1.7e19; *8* – KP926_lg400m_Pplus4e20_Nplus1.7e19;
9 – KP926_lg800m_Pplus4e19_Nplus1.7e18; *10* – KP926_lg800m_Pplus4e20_Nplus1.7e18;
11 – KP926_lg800m_Pplus4e19_Nplus1.7e19; *12* – KP926_lg800m_Pplus4e20_Nplus1.7e19

Рис. 10. Смоделированные выходные характеристики структур транзистора КП926 со статической индукцией (кривая *1* – исходная структура; кривая *2* – на порядок увеличена концентрация в p^+-слое; кривая *3* – на порядок увеличена концентрация в n^+-слое; кривая *4* – на порядок увеличены концентрации в обоих слоях)

Fig. 10. Simulated output characteristics of the structures of the KP926 transistor with static induction (curve *1* – original structure; curve *2* – an order of magnitude increase in concentration in the p^+ layer; curve *3* – an order of magnitude increase in concentration in the n^+ layer; curve *4* – an order of magnitude increase in concentrations in both layers)

Из анализа характеристик следует, что наибольший эффект с точки зрения коэффициента усиления достигается при одновременном увеличении концентрации легирования N_{p+} и N_{n+} p^+- и n^+-слоев соответственно. Увеличение концентрации легирования только p^+-слоя не дает значимого эффекта (см. рис. 10). Увеличение концентрации легирования n^+-слоя приводит к увеличению коэффициента усиления на 40 % в модели относительно исходной структуры. При этом одновременное увеличение концентрации в p^+- и n^+-слоях приводит к еще более значительному росту коэффициента усиления – примерно на 80 % относительно исходной структуры.

Предварительно можно заключить, что концентрация легирования в n^+-слое истока является основным сдерживающим фактором для коэффициента усиления. На это указывает также наклон характеристик. Характеристики структур с одинаковой концентрацией легирования в n^+-слое имеют одинаковый наклон. Это свидетельствует о том, что данный параметр оказывает определяющее воздействие на сопротивление открытого канала. Значения коэффициента усиления приведены в таблице.

Зависимость коэффициента усиления по току от поверхностной концентрации примеси в n^+- и p^+-областях
Dependence of the current gain on the surface concentration of the impurity in the n^+ and p^+ regions

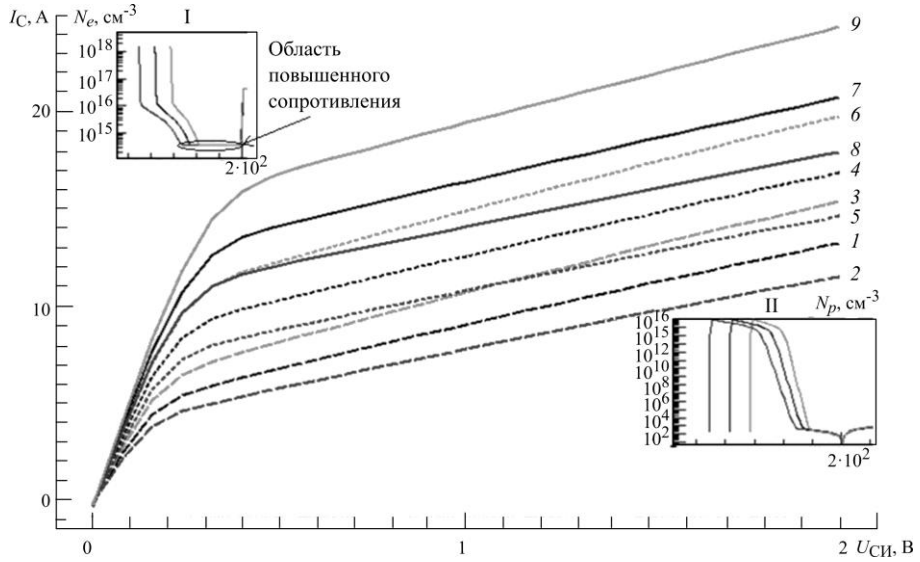
N_{p+}, см$^{-3}$	N_{n+}, см$^{-3}$	
	$1{,}7\cdot10^{18}$	$1{,}7\cdot10^{19}$
$4\cdot10^{19}$	26	35
$4\cdot10^{20}$	27	40

Рассмотрим влияние на работу устройства толщины эпитаксиального слоя (рис. 11). При подаче напряжения сток-исток $U_{СИ}$ избыточные электроны в эпитаксиальной области, которые до этого были распределены почти равномерно (см. рис. 6), движутся к положительно смещенному стоку, оставляя после себя область с низкой концентрацией носителей заряда. Дырки, инжектируемые p^+-затвором, также концентрируются вблизи n^+-области истока. Вследствие этого ниже p^+-слоя затвора образуется слаболегированная область с высоким сопротивлением (вставка I на рис. 11). Чем больше толщина эпитаксиального слоя, тем шире становится и эта слаболегированная область, что приводит к росту внутреннего сопротивления открытого транзистора.

Зависимость коэффициента усиления по току от толщины эпитаксиального слоя имеет вид:

Толщина эпитаксиального слоя, мкм	31	38	45
Коэффициент усиления по току	31	26	23

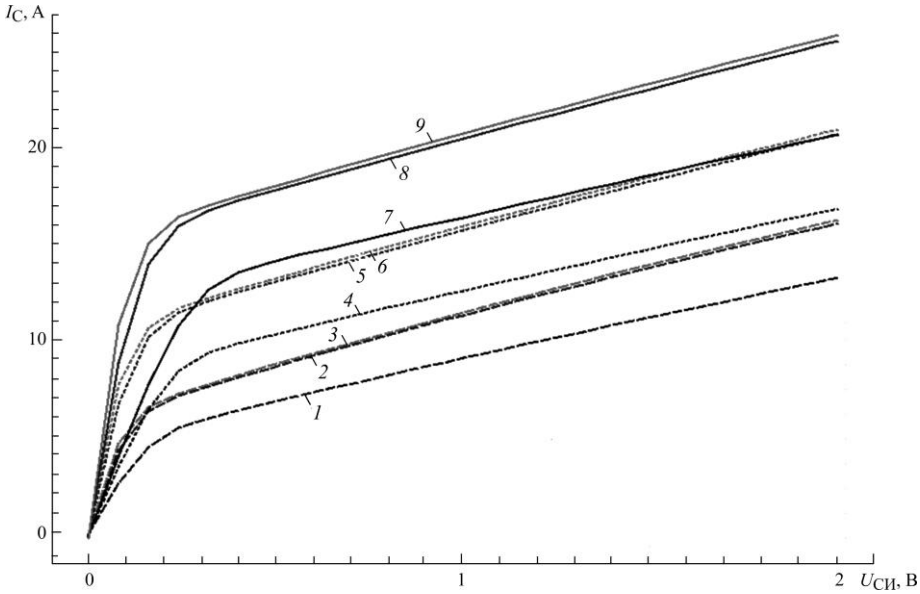
К числу параметров, оказывающих влияние на внутреннее сопротивление, также относятся параметры подложки. В данной конструкции подложка является последовательно включенным сопротивлением, которое оказывает влияние на всех участках выходной характеристики (рис. 12). При концентрации примеси в подложке ниже 10^{17} см$^{-3}$ влияние подложки на характеристики становится определяющим. Это нужно учитывать при выборе подложки.



1 – idvd_lg150m_Hepi38u; *2* – idvd_lg150m_Hepi45u; *3* – idvd_lg150m_Hepi31u;
4 – idvd_lg400m_Hepi38u; *5* – idvd_lg400m_Hepi45u; *6* – idvd_lg400m_Hepi31u;
7 – idvd_lg800m_Hepi38u; *8* – idvd_lg800m_Hepi45u; *9* – idvd_lg800m_Hepi31u

Рис. 11. Влияние толщины эпитаксиального *n*-слоя на выходные характеристики транзистора КП926. Вставка I – распределение электронов в каналах моделируемых структур при протекании максимального тока (при U_C = 2 В); вставка II – распределение дырок в каналах моделируемых структур

Fig. 11. The impact of the thickness of the epitaxial n-layer on the output characteristics of the KP926 transistor. Box I – distribution of electrons in the channels of the simulated structures when the maximum current flows at U_C = 2 V; box II – distribution of holes in the channels of the simulated structures



1 – idvd_lg150m_Nsub5e16; *2* – idvd_lg150m_Nsub5e17; *3* – idvd_lg150m_Nsub5e18;
4 – idvd_lg400m_Nsub5e16; *5* – idvd_lg400m_Nsub5e17; *6* – idvd_lg400m_Nsub5e18;
7 – idvd_lg800m_Nsub5e16; *8* – idvd_lg800m_Nsub5e17; *9* – idvd_lg800m_Nsub5e18

Рис. 12. Влияние концентрации примеси в подложке на выходные характеристики транзистора КП926

Fig. 12. The impact of the impurity concentration in the substrate on the output characteristics of the KP926 transistor

Заключение. Моделирование структуры транзистора КП926 с использованием системы приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD позволяет лучше понять влияние конструктивных и электрофизических параметров структуры на основные электрические параметры прибора и сделать следующие выводы:

– оптимальная глубина залегания истока должна быть в пределах 1,0–1,1 мкм;

– концентрацию примесей в истоке и затворе желательно повысить до 10^{20} $см^{-3}$;

– толщина эпитаксиального слоя (базы) должна быть как можно меньше для заданного рабочего напряжения;

– концентрация примеси в подложке должна быть не менее 10^{17} $см^{-3}$, а ее толщина – как можно меньше (современные технологии позволяют делать толщину пластины менее 100 мкм).

Применение данных предложений позволит более чем в два раза увеличить коэффициент усиления по току и во столько же раз снизить сопротивление канала. Соответственно, повысятся быстродействие прибора и эффективность его работы (уменьшатся мощность управления, статические и динамические потери).

Литература

1. ***Бономорский О. И., Кюрегян А. С., Горбатюк А. В., Иванов Б. В.*** Сравнительный анализ статических характеристик биполярных транзисторов с изолированным затвором и тиристоров с полевым управлением // Электротехника. 2015. № 2. С. 51а–56. EDN: TGTMIZ.

2. ***Кюрегян А. С., Горбатюк А. В., Иванов Б. В.*** Сравнение средних по времени потерь мощности в биполярных транзисторах с изолированным затвором и комбинированных СИТ-МОП-транзисторах // Электротехника. 2017. № 2. С. 52–56. EDN: XSDLUT.

3. Improvement on the dynamical performance of a power bipolar static induction transistor with a buried gate structure / ***Y. Wang, J. Feng, C. Liu et al.*** // J. Semicond. 2011. Vol. 32. No. 11. Art. No. 114005. https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/11/114005

4. Improvements on voltage-resistant performance of bipolar static induction transistor (BSIT) with buried gate structure / ***Y. Wang, J. Feng, C. Liu et al.*** // Sci. China Inf. Sci. 2012. Vol. 55. Iss. 4. P. 962–970. https://doi.org/10.1007/s11432-011-4523-1

5. ***Казалиева Э., Шахмаева А. Р.*** Обеспечение надежности работы биполярного со статической индукцией (БСИТ) транзистора // Техника и технология современных производств: сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. (Пенза, 25–26 апр. 2022) / под науч. ред. В. А. Скрябина, А. Е. Зверовщикова. Пенза: ПГАУ, 2022. С. 41–45. EDN: KDYUFQ.

6. ***Yamaguchi K., Toyabe T., Kodera H.*** Two-dimensional analysis of vertical junction gate FET's // Jpn. J. Appl. Phys. 1976. Vol. 15. No. S1. P. 163–170. https://doi.org/10.7567/JJAPS.15S1.163

7. ***Yamaguchi K., Kodera H.*** Optimum design of triode-like JFET's by two-dimensional computer simulation // IEEE Transactions on Electron Devices. 1977. Vol. 24. Iss. 8. P. 1061–1069. https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18877

8. ***Горбатюк А. В., Грехов И. В.*** Теория блокирующего состояния тиристора с электростатическим управлением (ТЭУ) // ФТП. 1981. Т. 15. № 7. С. 1353–1358.

9. ***Бичурин М. И., Букашев Ф. И., Петров В. М.*** SPICE-модели биполярных транзисторов со статической индукцией // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 3. С. 50–51. EDN: JJYNVN.

10. ***Дудар Н. Л.*** Моделирование кремниевого транзистора со статической индукцией // Доклады БГУИР. 2005. № 2 (10). С. 79–85.

11. ***Лагунович Н. Л., Борздов В. М., Турцевич А. С.*** Усовершенствование технологического маршрута изготовления и приборно-технологическое моделирование биполярного транзистора со статической индукцией // Доклады БГУИР. 2017. № 3 (105). С. 70–77. EDN: ZDINHN.

12. ***Шахмаева А. Р., Захарова П. Р.*** Применение САПР SYNOPSYS для моделирования БСИТ-транзистора // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: тр. VIII Междунар. конф. (Алматы, 9–10 июня 2011). Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2011. С. 823–828.

13. ***Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А., Захарова П. Р.*** Разработка конструктивно-технологических решений создания БСИТ-транзисторов с применением средств приборно-технологического моделирова-

ния // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (North Charleston, 4–5 авг. 2014). North Charleston: CreateSpace Independent Publ., 2014. С. 172–174. EDN: TDJNDR.

14. ***Максименко Ю., Грабежова В.*** Приборы со статической индукцией // Современная электроника. 2023. № 3. С. 16–24.

15. ***Максименко Ю. Н.*** Транзистор со статической индукцией КП926 с повышенным быстродействием // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. № 3 (266). С. 51–54. https://doi.org/10.36845/2073-8250-2022-266-3-51-54. – EDN: CASSYE.

16. ***Максименко Ю. Н., Грабежова В. К.*** Можно ли сделать идеальный полупроводниковый ключ? // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2023. № 1 (268). С. 45–53. https://doi.org/10.36845/2073-8250-2023-268-1-45-53. – EDN: HKOHQW.

17. ***Максименко Ю. Н., Грабежова В. К.*** Новая технологическая схема формирования структуры кристалла транзистора со статической индукцией КП926 // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2023. № 2 (269). С. 54–60. https://doi.org/10.36845/2073-8250-2023-269-2-54-60. – EDN: MMTJES.

18. ***Al-Sa'Di M., Fregonese S., Maneux C., Zimmer Th.*** TCAD modeling of NPN-Si-BJT electrical performance improvement through SiGe extrinsic stress layer // Mater. Sci. Semicond. Process. 2010. Vol. 13. Iss. 5-6. P. 344–348. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.03.002

Статья поступила в редакцию 23.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 07.02.2024 г.;
принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Максименко Юрий Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «Дизайн-центр биомикроэлектронных технологий "Вега"» (Россия, 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60А), violamaksimenko@yandex.ru

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

Силкин Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, 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), dsilkin@hse.ru

Грабежова Виктория Константиновна – генеральный директор ООО «Дизайн-центр биомикроэлектронных технологий "Вега"» (Россия, 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60А), Vikavega10@yandex.ru

References

1. Bonomorskii O. I., Kyuregyan A. S., Gorbatyuk A. V., Ivanov B. V. Comparative analysis of static characteristics of insulated gate bipolar transistors and thyristors with static induction. *Russ. Electr. Engin.*, 2015, vol. 86, iss. 2, pp. 93–97. https://doi.org/10.3103/S1068371215020042

2. Kyuregyan A. S., Gorbatyuk A. V., Ivanov B. V. A comparison of time-average power losses in insulated-gate bipolar transistors and hybrid SIT–MOS–transistors. *Russ. Electr. Engin.*, 2017, vol. 88, iss. 2, pp. 77–80. https://doi.org/10.3103/S1068371217020043

3. Wang Y., Feng J., Liu C., Wang Z., Zhang C., Chang P. Improvement on the dynamical performance of a power bipolar static induction transistor with a buried gate structure. *J. Semicond.*, 2011, vol. 32, no. 11, art. no. 114005. https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/11/114005

4. Wang Y., Feng J., Liu C., Wang Z.-T., Wang Z.-X., Zhang C. Improvements on voltage-resistant performance of bipolar static induction transistor (BSIT) with buried gate structure. *Sci. China Inf. Sci.*, 2012, vol. 55, iss. 4, pp. 962–970. https://doi.org/10.1007/s11432-011-4523-1

5. Kazalieva E., Shakhmayeva A. R. Ensuring the reliability of the bipolar with static induction (SIT) transistor. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennykh proizvodstv*, collected papers of the 3rd Russia-Wide res.-to-pract. conf. (Penza, Apr. 25–26, 2022), acad. eds V. A. Skryabin, A. E. Zverovshchikov. Penza, Penza State Agrarian Univ., 2022, pp. 41–45. (In Russian). EDN: KDYUFQ.

6. Yamaguchi K., Toyabe T., Kodera H. Two-dimensional analysis of vertical junction gate FET's. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1976, vol. 15, no. S1, pp. 163–170. https://doi.org/10.7567/JJAPS.15S1.163

7. Yamaguchi K., Kodera H. Optimum design of triode-like JFET's by two-dimensional computer simulation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1977, vol. 24, iss. 8, pp. 1061–1069. https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18877

8. Gorbatyuk A. V., Grekhov I. V. Theory of the blocking state of a thyristor with electrostatic control (TEC). *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Sov. Phys. Semicond.*, 1981, vol. 15, no. 7, pp. 1353–1358. (In Russian).

9. Bichurin M. I., Bukashev F. I., Petrov V. M. SPICE models of bipolar transistors with static induction. *Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii = Modern High Technologies*, 2005, no. 3, pp. 50–51. (In Russian). EDN: JJYNVN.

10. Dudar N. L. Simulation of a Si based static induction transistor. *Doklady BGUIR*, 2005, no. 2 (10), pp. 79–85. (In Russian).

11. Lagunovich N. L., Borzdov V. M., Turtsevich A. S. The improvement of process flow making bipolar static induction transistor and its device-process simulation. *Doklady BGUIR*, 2017, no. 3 (105), pp. 70–77. (In Russian). EDN: ZDINHN.

12. Shakhmayeva A. R., Zakharova P. R. Application of a TCAD SYNOPSYS for simulation of the BSIT transistor. *Perspektivnyye tekhnologii, oborudovaniye i analiticheskiye sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov*, works of the 8th International conf. (Almaty, June 9–10, 2011). Kursk, Southwest State Univ., 2011, pp. 823–828. (In Russian).

13. Shakhmayeva A. R., Shangereyeva B. A., Zakharova P. R. Development of constructive technology solutions of creation of BSIT transistors using means of instrumental and technological simulation. *Aktual'nyye napravleniya fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy,* proceeding of 4th International res.-to-pract. conf. (North Charleston, Aug. 4–5, 2014). North Charleston, CreateSpace Independent Publ., 2014, pp. 172–174. (In Russian). EDN: TDJNDR.

14. Maksimenko Yu., Grabezhova V. Devices with static induction. *Sovremennaya elektronika*, 2023, no. 3, pp. 16–24. (In Russian).

15. Maksimenko Yu. N. Static induction transistor KP926 with increased speed. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory = Electronic Technology. Series 2. Semiconductor Devices*, 2022, no. 3 (266), pp. 51–54. (In Russian). https://doi.org/10.36845/2073-8250-2022-266-3-51-54. – EDN: CASSYE.

16. Maksimenko Yu. N., Grabezhova V. K. Is it possible to make perfect switch? *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory = Electronic Technology. Series 2. Semiconductor Devices*, 2023, no. 1 (268), pp. 45–53. (In Russian). https://doi.org/10.36845/2073-8250-2023-268-1-45-53. – EDN: HKOHQW.

17. Maksimenko Yu. N., Grabezhova V. K. A new technological scheme for the formation of the crystal structure of a transistor with static induction KP926. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory = Electronic Technology. Series 2. Semiconductor Devices*, 2023, no. 2 (269), pp. 54–60. (In Russian). https://doi.org/10.36845/2073-8250-2023-269-2-54-60. – EDN: MMTJES.

18. Al-Sa'Di M., Fregonese S., Maneux C., Zimmer Th. TCAD modeling of NPN-Si-BJT electrical performance improvement through SiGe extrinsic stress layer. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2010, vol. 13, iss. 5-6, pp. 344–348. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.03.002

The article was submitted 23.01.2024; approved after reviewing 07.02.2024;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Yury N. Maksimenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Engineer, Vega Biomicroelectronic Technology Design Center LLC (Russia, 630082, Novosibirsk, Dachnaya st., 60A), violamaksimenko@yandex.ru

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 in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Sovetskaya st., 3) kpetrosynts@hse.ru

Denis S. Silkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., 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), dsilkin@hse.ru

Victoria K. Grabezhova – General Manager, Vega Biomicroelectronic Technology Design Center LLC (Russia, 630082, Novosibirsk, Dachnaya st., 60A), Vikavega10@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 621.3.049.774
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-504-513
EDN: HFNWDY

Интегральный регулятор напряжения, стабильный к шумам по цепям питания

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

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

synopsis@bk.ru

Аннотация. В современных коммуникативных устройствах разработчики ИС широко используют схемы управления питанием. Включение в состав ИС линейных регуляторов напряжения не только позволяет формировать уровни напряжения, но и дополнительно помогает получать более чистое внутреннее питающее напряжение. Применение классических регуляторов приводит к низкому коэффициенту подавления шумов напряжения питания (Power Supply Rejection Ratio, PSRR), для получения приемлемых характеристик требуются особые решения. В работе рассмотрена структура LDO-регулятора (Low-Dropout) со сниженным падением напряжения между входом и выходом с улучшенным параметром PSRR. Предлагаемое решение обеспечивает уровень PSRR до 45 дБ в диапазоне 1–10 МГц частоты помехи с учетом профиля PSRR источника опорного напряжения, приводит к улучшению параметров стабильности регулятора напряжения и в итоге – к уменьшению выходных шумов LDO-регулятора.

Ключевые слова: микроэлектроника, LDO-регулятор, шумы по цепям питания

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

Для цитирования: Волобуев П. С., Коршунов А. В., Семенов А. Н. Интегральный регулятор напряжения, стабильный к шумам по цепям питания // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 504–513. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-504-513. – EDN: HFNWDY.

© П. С. Волобуев, А. В. Коршунов, А. Н. Семенов, 2024

Original article

Integrated voltage regulator with improved stability to noise in supply networks

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

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

synopsis@bk.ru

Abstract. In modern communication devices, IC developers widely use power management schemes. The linear voltage regulators inclusion in the ICs not only allows the voltage levels forming but also helps to get a cleaner internal supply voltage. Classic regulators application leads to low power supply rejection ratio (PSRR), which requires special solutions to get acceptable characteristics. In this work, the structure of Low-Dropout (LDO) regulator with reduced voltage drop between input and output and improved PSRR parameter is considered. The proposed solution provides PSRR level of up to 45 dB in the range of 1–10 MHz noise impact in the presence of valid reference voltage PSRR profile, leads to improvement in voltage regulator stability and finally results in a reduction of LDO regulator output noise.

Keywords: microelectronics, linear voltage regulator, LDO, noise in supply networks

Funding: the work has been carried out with financial support of the Russian Science Foundation (project no. 23-29-00518, https://rscf.ru/en/project/23-29-00518/) and using equipment of Centre for collective use "Functional control and diagnostics of micro- and nanosystem technology" on the basis of the SMC "Technological Centre".

For citation: Volobuev P. S., Korshunov A. V., Semenov A. N. Integrated voltage regulator with improved stability to noise in supply networks. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 504–513. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-504-513. – EDN: HFNWDY.

Введение. Интеграция эффективной подсистемы питания внутри отдельной микросхемы в большинстве случаев снижает стоимость конечного изделия. Для питания внутрикристальных сложнофункциональных блоков различного назначения, выполненных, как правило, по разным опциям одной технологии изготовления, требуются отдельные уровни напряжений [1]. Классический регулятор [2] состоит из трех основных компонентов: мощного МОП-транзистора, операционного усилителя (ОУ) для формирования цепи обратной связи (ОС) и источника опорного напряжения с выходным напряжением $U_{\text{опор}}$. С проектной точки зрения регулятор напряжения должен работать при низком входном напряжении; обладать минимальным падением напряжения на мощном транзисторе; выдавать необходимый рабочий ток в нагрузку; противостоять шумам по цепи собственного питания.

При создании блока LDO-регулятора (Low Dropout) следует проанализировать работу ОС, выбрать эффективный метод частотной компенсации петли ОС. LDO-регулятор может находиться в нестабильном состоянии ввиду изменения положения неоснов-

ных полюсов системы при активном нагрузочном профиле, иметь осцилляции сигнала на выходе. В настоящей работе рассматриваются конструктивные особенности LDO-регулятора со сниженным падением напряжения между входом и выходом с улучшенным коэффициентом подавления шумов напряжения питания (Power Supply Rejection Ratio, PSRR).

Особенности интегрального регулятора напряжения. Режимы работы блока LDO-регулятора представлены на рис. 1. В рабочем режиме происходит непрерывное регулирование выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, петля ОС работает с большим положительным коэффициентом усиления. При значительном снижении рабочего (входного) напряжения $U_{\text{вх}}$ происходит переход транзистора к работе в крутой области. При этих условиях падает коэффициент усиления петли ОС. Регулятор отдает в нагрузку требуемый ток, однако поддерживать стабильное напряжение $U_{\text{вых}}$ не может. В режиме отключения LDO-регулятора уровня входного напряжения недостаточно для формирования выходного напряжения, динамический диапазон работы транзисторов уменьшается.

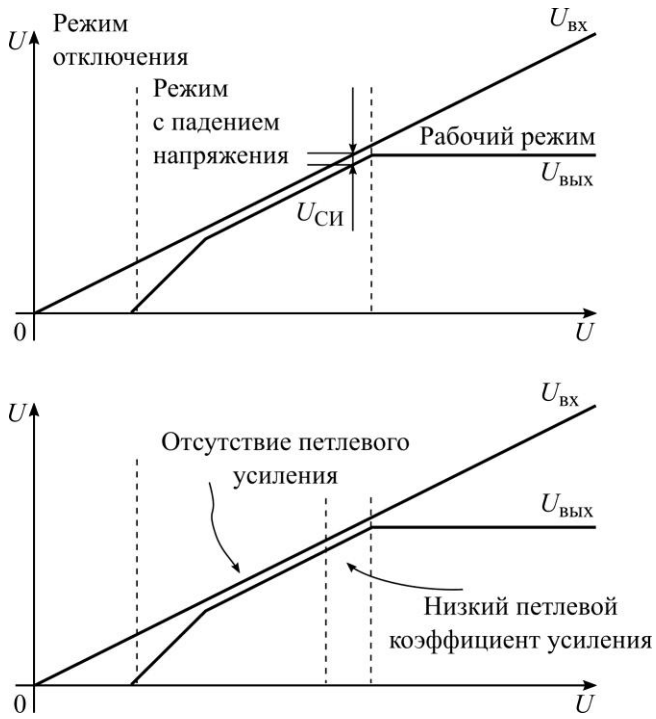


Рис. 1. Режимы работы интегрированного блока LDO
Fig. 1. Operating modes of the integrated LDO block

Упрощенно LDO-регулятор может быть рассмотрен как многокаскадный усилитель с отрицательной обратной связью [3]. Среди основных теоретических методов компенсации можно выделить разделение полюсов, взаимокомпенсацию полюсов / нулей, компенсацию на основе эффекта Миллера, коррекцию путем подачи сигнала вперед и др. В настоящей работе выбрана стандартная компенсация через формирование основного полюса, требующая отдельного вывода корпуса микросхемы. Данный вид компенсации основан на подключении большой внешней емкости C_L, наличие которой стабилизирует уровень выходного напряжения в случае изменения профиля токовой нагрузки. Для проведения оценочного частотного анализа схемотехники LDO-регулятора могут быть использованы схемы, приведенные на рис. 2.

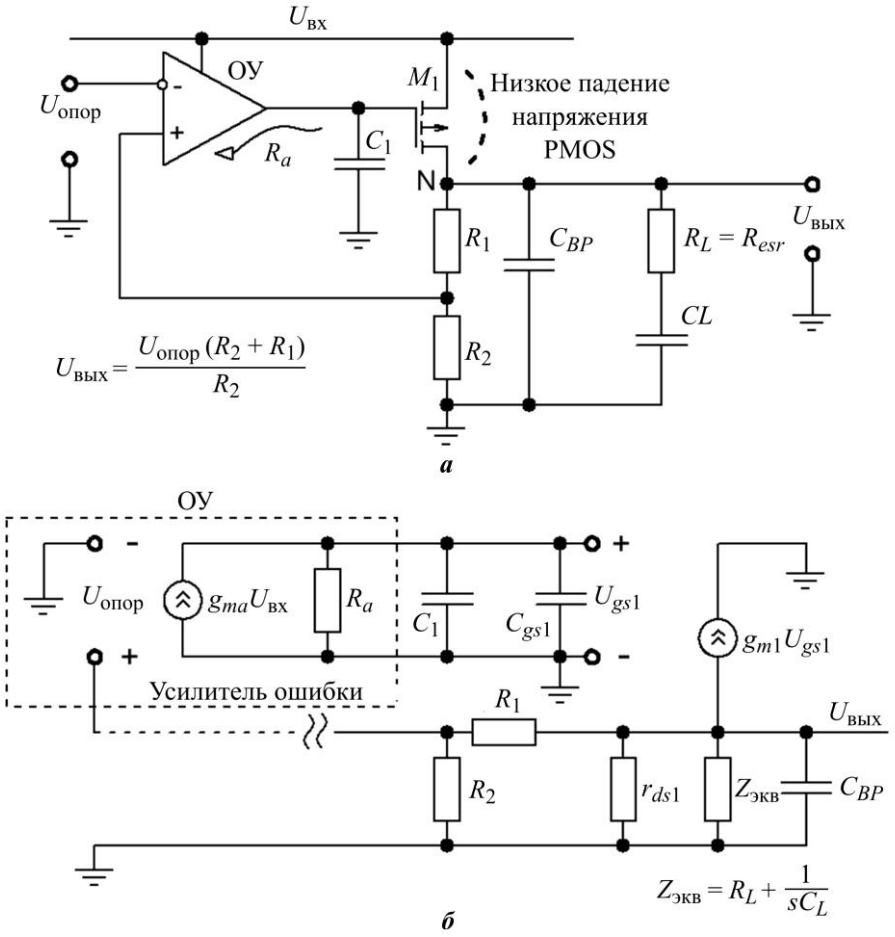


Рис. 2. Принципиальная (*а*) и эквивалентная (*б*) малосигнальные схемы LDO-регулятора
Fig. 2. Electrical circuit (*a*) and equivalent (*b*) small-signal circuit of the LDO regulator

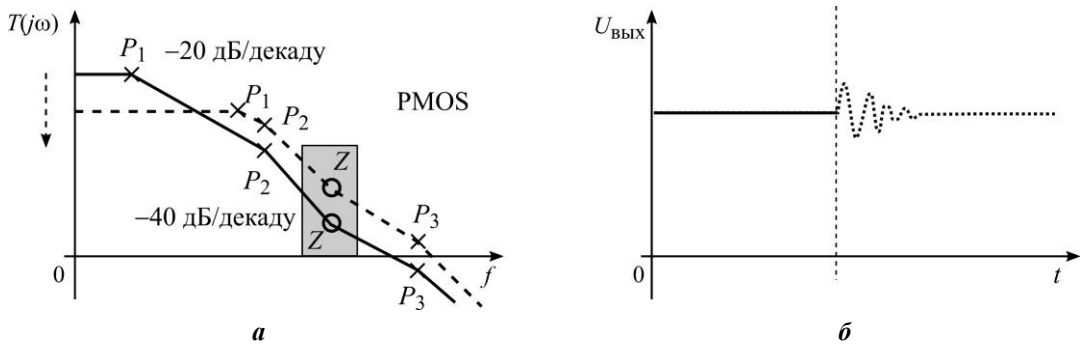
Выходной импеданс $Z_{вых}(s)$ блока LDO-регулятора рассчитывается на основе упрощенного выражения

$$Z_{вых}(s) = \frac{\left(\left(r_{ds1} \| (R_1 + R_2)\right)\left(1 + sR_L C_L\right)\right)}{s^2\left(r_{ds1} \| (R_1 + R_2)\right)R_L C_L C_{BP} + s\left[\left(r_{ds1} \| (R_1 + R_2)\right) + R_L\right]C_L + s\left[r_{ds1} \| (R_1 + R_2)\right]C_{BP} + 1}.$$

Полюсы и нули на АЧХ формируются емкостями C_1, C_L и C_{BP}. Полюсы $P_1 = \frac{1}{r_{out}C_L}$, $P2 = \frac{1}{R_a C_1}$, $P_3 = \frac{1}{R_L C_{BP}}$, ноль $Z_{esr} = \frac{1}{R_L C_L}$. Стабильность выходного напряжения LDO-регулятора при разделении полюсов определяется сопротивлением $R_L = R_{esr}$, номинальное значение которого важно для обеспечения устойчивой работы регулятора [4].

В процессе разработки важно получить как можно более точное приближение для сопротивления R_{esr}. Проблема состоит в том, что у номинала R_{esr} должно быть определенное минимальное значение для получения спада коэффициента усиления –20дБ/декаду до момента пересечения графиком уровня 0 дБ. При этом номинал не должен быть настолько большим (верхняя граница), чтобы не допустить выхода полюса P_3 в область с положительным усилением.

АЧХ блока LDO-регулятора на основе *p*-МОП-транзистора показывает увеличение частоты полюса P_1 с ростом нагрузочного тока (рис. 3, *а*), рост ширины полосы системы, но снижение при этом усилительных свойств петли регулятора. Несмотря на то что с ростом полосы улучшается временной отклик блока, он приводит к ухудшению стабильности системы и, как следствие, к возможному появлению осцилляций на выходе LDO-системы. Динамику такого поведения показывает временная диаграмма на рис. 3, *б*.



а *б*

Рис. 3. АЧХ LDO-регулятора (*а*) и временная диаграмма изменения напряжения $U_{вых}$ при изменении профиля токовой нагрузки (*б*): —— минимальная токовая нагрузка; - - - полная токовая нагрузка
Fig. 3. Frequency response of LDO regulator (*a*) and timing diagram of the output voltage changes with respect to the current load profile: —— minimum current load; - - - full current load

В целях обеспечения корректного функционирования блока LDO-регулятора важной задачей является получение хорошей стойкости к помехам по питанию. Должен поддерживаться стабильный уровень напряжения на выходе при наличии каких-либо помех по цепям, отвечающих за подвод питания к блоку для недопущения отказов ведомых схем.

Улучшение помехозащищенности выходного напряжения LDO-регулятора. В общем случае коэффициент подавления шумов по цепи питания (PSRR) [5] для блока формирования напряжения может быть выражен на основе формулы, содержащей параметр выходной амплитуды напряжения помехи $U_{вых.пм}$

$$\mathrm{PSRR}(\omega) = 20\log_{10}\frac{U_{вых.пм}}{U_{вх.пм}}\,[\text{дБ}].$$

Действующие по входу питания низкочастотные помехи с амплитудой $U_{вх.пм}$ должны эффективно подавляться. В области низких частот желателен постоянный уровень подавления. Далее с ростом частоты уровень подавления объективно снижается, однако коэффициент усиления помехи не должен быть положительным, так как в этом случае сопротивление петли ОС уменьшается до такой степени, что формируется путь для высокочастотного сигнала от шины питания до выхода LDO-регулятора. Высокие значения коэффициента подавления необходимы в области частот от 10 Гц до 10 МГц.

На коэффициент PSRR блока LDO-регулятора влияют следующие коэффициенты: коэффициент PSRR источника опорного напряжения; коэффициент усиления A_U при разомкнутой петле ОС блока LDO-регулятора (фактически коэффициент усиления усилителя LDO-регулятора при разомкнутой петле ОС); коэффициент усиления A_{UO}, рассчитываемый от входного узла блока LDO-регулятора до его выходного узла.

Предлагаемая схема LDO-регулятора на основе *p*-МОП-транзистора, улучшающая уровни подавления помехи по питанию в широком диапазоне частот за счет применения внутренних фильтров, показана на рис. 4. При этом стабильность LDO-регулятора обеспечивается за счет метода непрямой компенсации ОУ, что отличается от применяемых в классических LDO-регуляторах решениях [6].

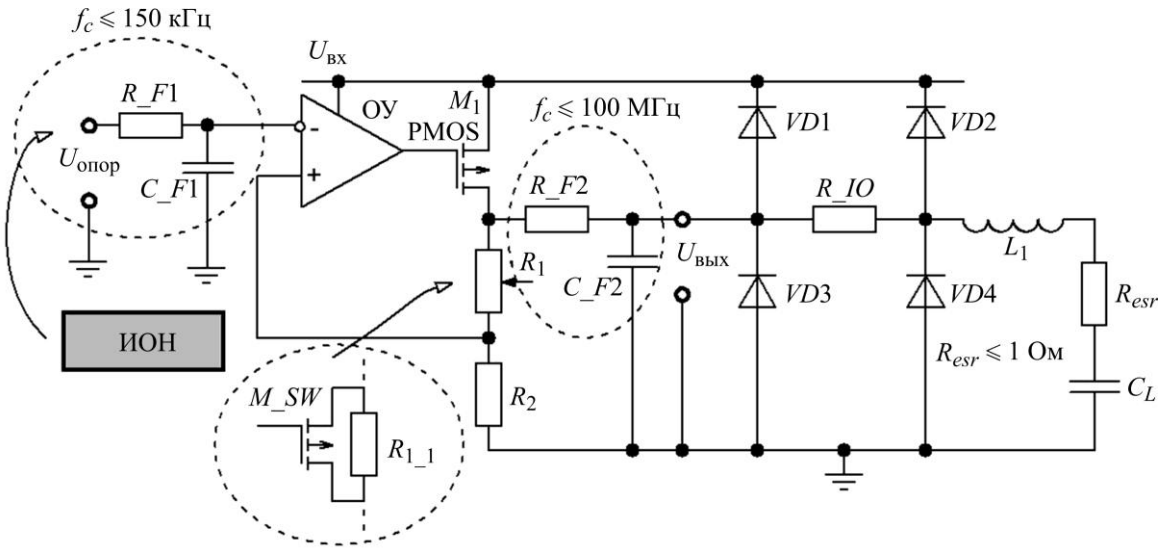


Рис. 4. Принципиальная схема разработанного LDO-регулятора
Fig. 4. Electrical circuit of the developed LDO regulator

Основной уровень шума формируется на истоке мощного *p*-МОП-транзистора. Для улучшения численного значения параметра PSRR напряжение между затвором и истоком должно оставаться стабильным под действием шумов. Любой выходной шум источника опорного напряжения (ИОН) усиливается петлей усилителя. Для борьбы с шумом ИОН используется входной RC-фильтр с низкой частотой среза (менее 150 кГц), что требует интегрального сопротивления от 100 кОм. При этом номинал фильтрационной емкости должен составлять несколько десятков пикофарад. Такая емкость практически не оказывает существенного влияния на переходные процессы при включении LDO-регулятора.

Стандартные LDO-регуляторы обладают не лучшими собственными значениями PSRR на средних и особенно на высоких частотах помех по питанию [7]. Для устранения этой особенности в работе использован пассивный интегральный RC-фильтр со стороны выхода LDO-регулятора. Для конфигурации на *p*-МОП-транзисторе требования к высокому коэффициенту усиления не предъявляются, по этой причине в качестве усилителя ошибки спроектирован вариант двухкаскадного ОУ с нагрузкой в виде низковольтного каскодного токового зеркала. Развязывая высокое выходное сопротивление выхода ОУ и высокую эквивалентную емкость входа транзистора M_1, можно улучшить фазовый запас системы, но это требует дополнительного усилителя, который увеличит общее потребление.

Особенностью предлагаемого решения является использование компенсации каскодной схемы ОУ и метода непрямой частотной компенсации, не вызывающей рост емкости входа *p*-МОП-транзистора и не требующей дополнительных усилительных конструкций.

Результаты и их обсуждение. Проведенный на основе предложенной принципиальной электрической схемы частотный анализ (рис. 5 и 6) подтверждает стойкость регулятора к помехам по питанию в широком диапазоне частот помехи. Запас по фазе системы LDO-регулятора не опускается ниже 55° при полной токовой нагрузке, обеспечивая отсутствие самоподдерживающихся колебательных процессов на выходе блока.

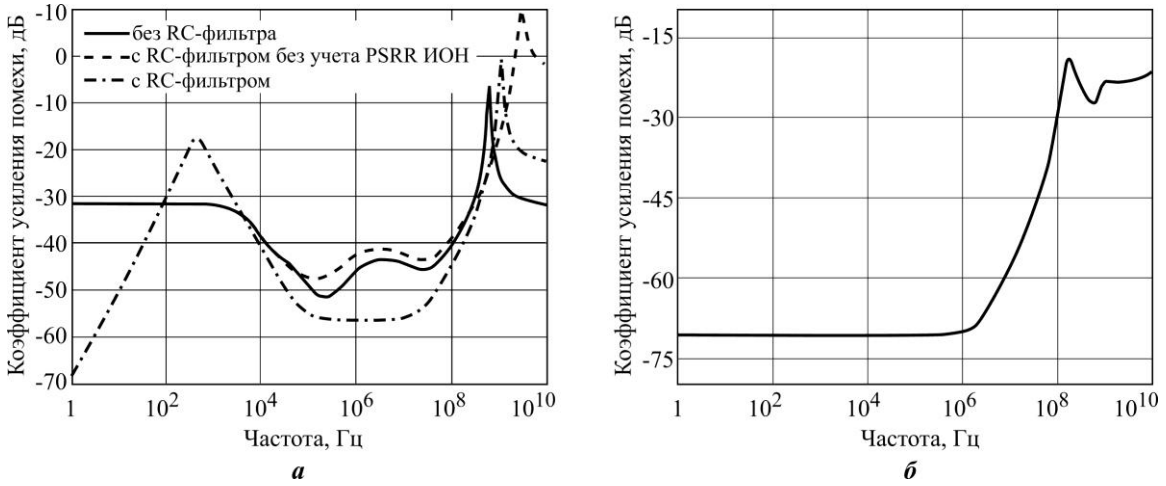


Рис. 5. Рассчитанные значения коэффициента PSRR для LDO-регулятора (*а*) и каскодного ОУ (*б*)
Fig. 5. Calculated PSRR values for LDO regulator (*a*) and cascode opamp (*b*)

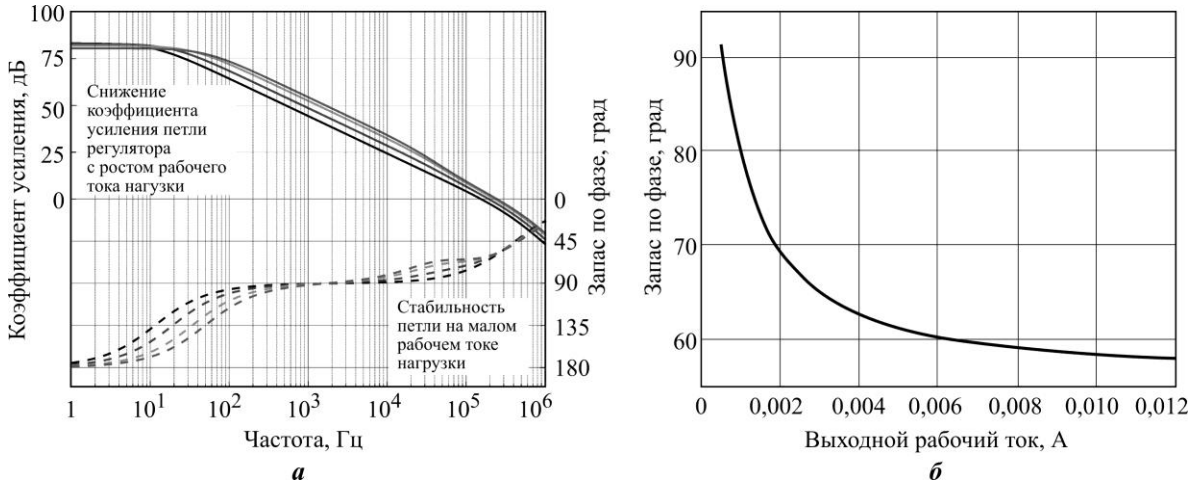


Рис. 6. Частотный анализ стабильности блока LDO-регулятора: *а* – диаграмма Боде петли; *б* – зависимость запаса по фазе петли LDO-регулятора от рабочего тока
Fig. 6. Frequency analysis of LDO regulator block stability: *a* – diagram of the Bode loop; *b* – dependence of the phase margin of the LDO regulator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

Результаты временного анализа (рис. 7) основываются на изменении параметра токовой нагрузки от 1 до 5 мА на выходе LDO-регулятора с частотой, равной удвоенной частоте полосы петли регулятора. Изменение выходного напряжения стабильно во времени и составляет несколько милливольт, что говорит о корректности примененных схемных решений.

Проанализированные характеристики LDO-регуляторов представлены в таблице. По сравнению с опубликованными в научной литературе данными близких аналогов, работающих на пониженных значениях питающих напряжений, для работы блока требуется стандартное напряжение питания до 2,5 В.

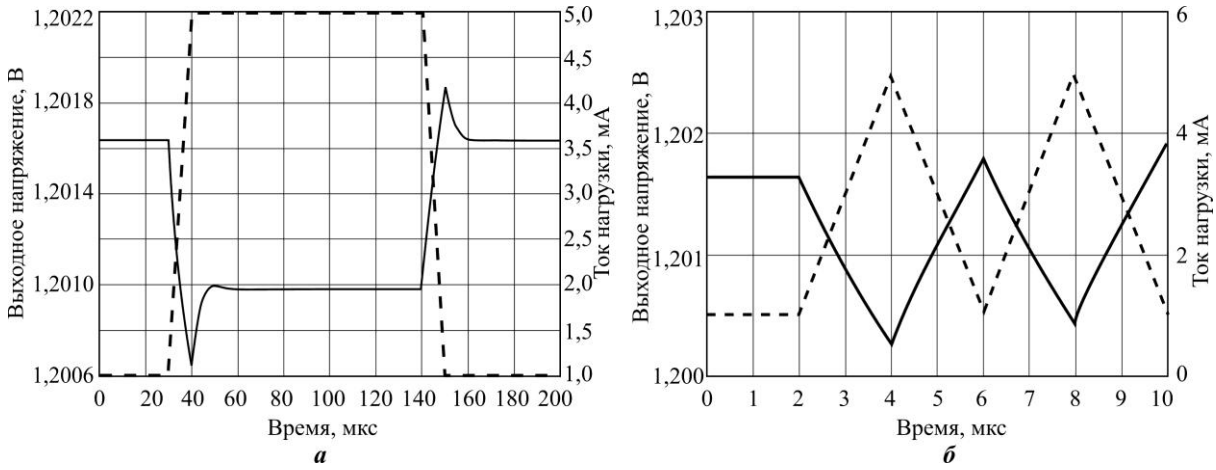


Рис. 7. Временной отклик блока LDO-регулятора на изменение нагрузки от 1 до 5 мА (*а*) и при треугольном нарастающем профиле нагрузки (*б*)
Fig. 7. LDO regulator block timing response to a change in load from 1 to 5 mA (*a*) and with a triangular incremental load profile (*b*)

Характеристики LDO-регуляторов
Specifications of the LDO regulators

Параметр	Настоящая работа	[8]	[9]	[10]
Технология, нм	65	65	65	65
$U_{вх}$, В	2,5	1,2	1,2	1,2
$U_{вых}$, В	1,2	1	0,98	1
Нагрузка, мА	≤12	≤25	≤20	≤25
Падение напряжения, В	>0,2	0,2	0,22	0,15
Ток покоя, мкА	110 (без схемы ИОН)	<300	385	150
Нестабильность выходного напряжения, мВ/мВ	0,0028	0,0038	0,08	–
Нестабильность по нагрузке, мВ/мА	0,27	0,042	2,3	0,04
Коэффициент PSRR LDO-регулятора, дБ	46 дБ на 1 МГц 44 дБ на 10 МГц (со схемой ИОН)	52 дБ на 1 МГц 36 дБ на 10 МГц	76,80 дБ на 1 МГц 58,3 дБ на 10 МГц	61 дБ на 1 МГц 47 дБ на 10 МГц
PSRR ОУ, дБ	70 дБ на 1МГц	–	–	–
Полоса петли регулятора, кГц	≤250	–	–	–
Площадь, мм^2	0,025 (без схемы ИОН)	0,087	0,092	0,14

Заключение. Спроектированный LDO-регулятор характеризуется высокими значениями параметра PSRR и предназначен для питания сложнофункциональных блоков. Полученные результаты моделирования блока LDO-регулятора показывают, что схемотехнические решения могут быть использованы для применения в устройствах управления питанием. Несмотря на достигнутые параметры, практическая реализация регу-

ляторов требует от разработчиков высокой квалификации и опыта ввиду особенностей их интеграции в составе ИС, а также более комплексного анализа параметров блока с учетом реальных рабочих сценариев.

Литература

1. ***Zeng Z., Ye X., Feng Z., Li P.*** Tradeoff analysis and optimization of power delivery networks with on-chip voltage regulation // Design Automation Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2010. P. 831–836.

2. ***Rincon-Mora G. A., Allen P. E.*** A low-voltage, low quiescent current, low drop-out regulator // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1998. Vol. 33. No. 1. P. 36–44. https://doi.org/10.1109/4.654935

3. ***Milliken R. J., Silva-Martínez J., Sánchez-Sinencio E.*** Full on-chip CMOS low-dropout voltage regulator // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2007. Vol. 54. No. 9. P. 1879–1890. https://doi.org/10.1109/TCSI.2007.902615

4. ***Lee B. S.*** Understanding the stable range of equivalent series resistance of LDO regulator // Analog Applications Journal. 1999. Nov. P. 14–16.

5. ***Chen Y.-P., Tang K.-T.*** A fully integrated high-power-supply-rejection linear regulator with an output-supplied voltage reference // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2020. Vol. 67. No. 11. P. 3828–3838. https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3008031

6. Evolution of low drop out voltage regulator in CMOS technologies / ***N. B. Mustafa, S. Amin, M. B. I. Reaz et al.*** // Przegląd Elektrotechniczny. 2015. No. 12. Art. No. 95242. https://doi.org/10.15199/48.2015.12.06

7. ***Huang C.-H., Liao W.-C.*** A high-performance LDO regulator enabling low-power SoC with voltage scaling approaches // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2020. Vol. 28. No. 5. P. 1141–1149. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2020.2972904

8. An external capacitorless low-dropout regulator with high PSR at all frequencies from 10 kHz to 1 GHz using an adaptive supply-ripple cancellation technique / ***Y. Lim, J. Lee, S. Park et al.*** // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2018. Vol. 53. No. 9. P. 2675–2685. https://doi.org/10.1109/JSSC.2018.2841984

9. ***Choe Y.-J., Nam H., Park J.-D.*** A low-dropout regulator with PSRR enhancement through feed-forward ripple cancellation technique in 65 nm CMOS process // Electronics. 2020. Vol. 9. Iss. 1. Art. No. 146. https://doi.org/10.3390/electronics9010146

10. PSR enhancement through super gain boosting and differential feed-forward noise cancellation in a 65-nm CMOS LDO regulator / ***Y.-S. Yuk, S. Jung, C. Kim et al.*** // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2014. Vol. 22. No. 10. P. 2181–2191. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2013.2287282

Статья поступила в редакцию 02.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 17.11.2023 г.; принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

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

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

Семенов Александр Николаевич – научный сотрудник отдела интегральных микросхем НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), A.Semenov@tcen.ru

References

1. Zeng Z., Ye X., Feng Z., Li P. Tradeoff analysis and optimization of power delivery networks with on-chip voltage regulation. *Design Automation Conference.* Anaheim, CA, IEEE, 2010, pp. 831–836.

2. Rincon-Mora G. A., Allen P. E. A low-voltage, low quiescent current, low drop-out regulator. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1998, vol. 33, no. 1, pp. 36–44. https://doi.org/10.1109/4.654935

3. Milliken R. J., Silva-Martínez J., Sánchez-Sinencio E. Full on-chip CMOS low-dropout voltage regulator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2007, vol. 54, no. 9, pp. 1879–1890. https://doi.org/10.1109/TCSI.2007.902615

4. Lee B. S. Understanding the stable range of equivalent series resistance of LDO regulator. *Analog Applications Journal*, 1999, Nov., pp. 14–16.

5. Chen Y.-P., Tang K.-T. A fully integrated high-power-supply-rejection linear regulator with an output-supplied voltage reference. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, vol. 67, no. 11, pp. 3828–3838. https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3008031

6. Mustafa N. B., Amin S., Reaz M. B. I., Hashim F. H., Kamal N. Evolution of low drop out voltage regulator in CMOS technologies. *Przegląd Elektrotechniczny,* 2015, no. 12, art. no. 95242. https://doi.org/10.15199/48.2015.12.06

7. Huang C.-H., Liao W.-C. A high-performance LDO regulator enabling low-power SoC with voltage scaling approaches. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 1141–1149. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2020.2972904

8. Lim Y., Lee J., Park S., Jo Y., Choi J. An external capacitorless low-dropout regulator with high PSR at all frequencies from 10 kHz to 1 GHz using an adaptive supply-ripple cancellation technique. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, vol. 53, no. 9, pp. 2675–2685. https://doi.org/10.1109/JSSC.2018.2841984

9. Choe Y.-J., Nam H., Park J.-D. A low-dropout regulator with PSRR enhancement through feed-forward ripple cancellation technique in 65 nm CMOS process. *Electronics*, 2020, vol. 9, iss. 1, art. no. 146. https://doi.org/10.3390/electronics9010146

10. Yuk Y.-S., Jung S., Kim C., Gwon H.-D., Choi S., Cho G.-H. PSR enhancement through super gain boosting and differential feed-forward noise cancellation in a 65-nm CMOS LDO regulator. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2014, vol. 22, no. 10, pp. 2181–2191. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2013.2287282

The article was submitted 02.11.2023; approved after reviewing 17.11.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

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

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

Alexander N. Semenov – Scientific Researcher of the Integrated Circuits Department, SMC "Technological Center" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), A.Semenov@tcen.ru

Научная статья
УДК 621.382.049.77:004.946
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-514-524
EDN: DMVIUI

Модификация SPICE-моделей КМОП-микросхем для имитации частотного отклика кольцевого генератора на низкоинтенсивное ионизирующее облучение

С. В. Шумарин, Т. Н. Фролова

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

sergey.shumarin@vlsu.ru

Аннотация. В условиях ионизирующей радиации большое влияние на работоспособность электронных устройств на основе КМОП элементной базы оказывают поверхностные эффекты, связанные с подзатворным диэлектриком и границей раздела кремний – диэлектрик. Симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом позволяет на этапе схемотехнического проектирования учитывать дестабилизирующие факторы и анализировать поведение интегральных микросхем в конкретных условиях эксплуатации. В работе описаны особенности схемотехнического моделирования КМОП-микросхем космического применения, учитывающие дестабилизирующее низкоинтенсивное ионизирующее воздействие. Рассмотрено изменение порогового напряжения МОП-транзисторов, наиболее чувствительного к дозовому воздействию. Выполнена модификация SPICE-модели микросхемы 1564ЛЕ1 путем включения дополнительных источников напряжения, имитирующих сдвиги пороговых напряжений *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов. Показано, что SPICE-модель позволяет получать отклик электронных устройств на ионизирующее воздействие в течение тысячи часов в едином запуске симулятора на типовой рабочей станции. Проведен виртуальный эксперимент с кольцевым генератором, собранным на базе микросхемы 1564ЛЕ1, для условий низкоинтенсивного ионизирующего излучения с постоянной мощностью дозы P = 0,1 рад/с в течение 5000 ч. Представлена полученная с использованием сжатия временной оси зависимость частоты автоколебаний кольцевого генератора от времени облучения.

Ключевые слова: низкоинтенсивное ионизирующее изучение, SPICE-модель, КМОП-микросхема, МОП-транзистор, пороговое напряжение, кольцевой генератор

Для цитирования: Шумарин С. В., Фролова Т. Н. Модификация SPICE-моделей КМОП-микросхем для имитации частотного отклика кольцевого генератора на низкоинтенсивное ионизирующее облучение // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 514–524. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-514-524. – EDN: DMVIUI.

© С. В. Шумарин, Т. Н. Фролова, 2024

Original article

Modification of SPICE models of CMOS microcircuits to simulate the frequency response of a ring oscillator to low-intensity ionizing radiation

S. V. Shumarin, T. N. Frolova

Vladimir State University, Vladimir, Russia

sergey.shumarin@vlsu.ru

Abstract. Under conditions of ionizing radiation, the operating capability of electronic devices based on CMOS hardware components is greatly affected by surface effects associated with gate insulator and silicon – dielectric interface. The open-source simulator of general purpose electronic circuits allows consideration of destabilizing factors and analysis of integrated microcircuit behavior in specific operational conditions during the hardware design phase. In this work, the features of circuit simulation of CMOS chips for space applications are described, taking account of the destabilizing low-intensity ionized effect. The change in the threshold voltage of MOS transistors, which is most sensitive to dose effects, is considered. The SPICE model of the 1564LE1 microcircuit has been modified by including additional voltage sources that simulate shifts in the threshold voltages of *n*- and *p*-channel MOS transistors. It was demonstrated that SPICE model allows obtaining the response of electronic devices to ionizing effects for thousands of hours in a single run of the simulator on a standard workstation. A virtual experiment was carried out with a ring oscillator assembled on the basis of 1564LE1 microcircuit, under conditions of low-intensity ionizing radiation with a constant dose rate $P = 0.1$ rad/s for 5000 hours. The dependence of the ring oscillator self-oscillation frequency on the irradiation time obtained using time axis compression is presented.

Keywords: low-intensity ionizing radiation, SPICE model, CMOS chip, MOSFET, threshold voltage, ring oscillator

For citation: Shumarin S. V., Frolova T. N. Modification of SPICE models of CMOS microcircuits to simulate the frequency response of a ring oscillator to low-intensity ionizing radiation. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 514–524. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-514-524. – EDN: DMVIUI.

Введение. Компьютерное моделирование – одно из основных средств предварительной оценки радиационного ресурса интегральных микросхем космического применения на начальном этапе разработки изделия. Применение симулятора электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом (SPICE) позволяет на этапе схемотехнического проектирования учитывать дестабилизирующие факторы и анализировать поведение интегральных микросхем в конкретных условиях эксплуатации [1]. На борту космических аппаратов наряду с микропроцессорными микросхемами субмикронной технологии применяются микросхемы с более грубыми проектными нормами. Микросхемы микронной технологии проявляют большую стойкость к одиночным сбоям и тиристорному эффекту, их радиационный ресурс определяется в основном скоро-

стью деградации параметров при накоплении дозы поглощенной энергии ионизирующего излучения космического пространства.

Наибольшее влияние на работоспособность электронных устройств на основе КМОП элементной базы в условиях ионизирующей радиации оказывают поверхностные эффекты, связанные с подзатворным диэлектриком и границей раздела кремний – диэлектрик [2]. В диэлектрических слоях МОП-структур (подзатворного и изолирующих) накапливается дырочный заряд и формируются поверхностные состояния (ПС) на границе раздела диэлектрик – кремний [3]. Радиационно-индуцированные токи утечки, обусловленные накопленным в изолирующих окислах положительным зарядом, – главная причина дозовой деградации МОП-транзисторов с субмикронными проектными нормами, в которых практически не происходит заметного накопления заряда в подзатворном окисле нанометровой толщины даже при высокоинтенсивном облучении [4].

Основными механизмами деградации КМОП интегральных микросхем с микронными проектными нормами являются накопление положительного заряда в подзатворном окисле и генерация ПС на границе раздела диоксид кремния – кремний. Положительный заряд в оксиде обусловливает сдвиг порогового напряжения и появление токов утечек транзисторов в закрытом состоянии. ПС приводят к уменьшению подвижности носителей заряда в канале. Суммарный сдвиг порогового напряжения обусловлен положительным зарядом в оксиде и зарядом ПС [4].

Процессы деградации МОП-структур при облучении определяются соотношением между процессами накопления зарядов и процессами их релаксации (отжига) [4]. Скорости накопления и отжига заряда существенно зависят от мощности дозы, напряжения на затворе, температуры, толщины оксидной пленки, технологии ее получения. В случае облучения с высокой мощностью дозы в течение малого времени характерна незначительная релаксация заряда в оксиде и недостаточность времени для накопления заряда ПС [5]. Сдвиги пороговых напряжений *n*- и *p*-канальных транзисторов могут быть большими и отрицательными. Большие отрицательные сдвиги пороговых напряжений *n*-канальных транзисторов могут значительно увеличить токи утечки сток-исток.

При средних значениях мощности дозы будет иметь место некоторая нейтрализация захваченного в оксиде заряда и накопление ПС [5]. В этом случае могут быть большими сдвиги порогового напряжения в связи с накопленным в оксиде зарядом и зарядом ПС. Суммарное изменение порогового напряжения *n*-канального транзистора может быть небольшим вследствие компенсации составляющих радиационного сдвига.

При воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения скорость рекомбинации дырок с электронами будет соизмерима со скоростью генерации электронно-дырочных пар в диэлектрике, что обусловливает уменьшение положительного объемного заряда в диэлектрике [6]. Это приводит к положительному сдвигу порогового напряжения *n*-канальных транзисторов и снижению подвижности носителей. В результате снижается рабочий ток транзисторов и может произойти отказ микросхем по динамическим параметрам [5].

При низкоинтенсивном ионизирующем воздействии на МОП-транзисторы микронной технологии с толщиной подзатворного оксида десятки нанометров вклад заряда в объеме подзатворного диоксида кремния в сдвиг порогового напряжения МОП-структур уменьшается и существенно возрастает роль заряда поверхностных дефектов на границе раздела кремний – диоксид кремния. Увеличение плотности ПС приводит к уменьшению подвижности носителей заряда в канале транзистора [5]. Изменение пороговых напряжений и уменьшение подвижности носителей заряда (удельной крутизны транзисторов) влияют на динамические параметры КМОП логических элементов.

Увеличение плотности ПС при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения уменьшает подвижность носителей в канале на 10–15 % [7, 8]. Таким образом, наиболее чувствительно к ионизирующему излучению пороговое напряжение, влияющее на быстродействие.

Цель настоящей работы – прогнозирование временно́го изменения частоты кольцевого генератора [9] на КМОП-микросхемах микронной технологии в условиях постоянно воздействующего низкоинтенсивного ионизирующего космического излучения.

Постановка задачи. Основным параметром при моделировании реакции кольцевого генератора является пороговое напряжение. Величина изменения пороговых напряжений МОП-транзисторов зависит от конструктивно-технологического исполнения микросхемы. Для моделирования временно́го изменения пороговых напряжений МОП-транзисторов кольцевого генератора на КМОП-микросхемах 1564 серии в условиях постоянно воздействующего ионизирующего излучения использовали экспериментальные зависимости плотности поверхностных дефектов от времени облучения при мощности дозы $P = 0{,}1$ рад/с для *n*-канальных транзисторов [10] и *p*-канальных транзисторов [11] микросхемы серии 1526 аналогичного технологического исполнения.

Для имитации частотного отклика кольцевого генератора в условиях ионизирующего излучения решали прикладную задачу по модификации SPICE-моделей КМОП-микросхем, позволяющих учитывать временны́е изменения пороговых напряжений транзисторов. При этом обеспечивали возможность получения осциллограмм выходного напряжения кольцевого генератора в едином процессе моделирования без использования препроцессоров обработки результатов.

Модификация SPICE-модели микросхемы. Сдвиг порогового напряжения $\Delta U(t)$, обусловленный зарядом радиационно-индуцированных поверхностных дефектов $N(t)$, определяется выражением [12]

$$\Delta U(t) = \left| \frac{qN(t)}{C_i} \right|,$$

где q – заряд электрона; $C_i = \dfrac{\varepsilon_{SiO_2}\varepsilon_0}{d}$ – удельная емкость подзатворного диоксида кремния; ε_{SiO_2} – диэлектрическая постоянная диоксида кремния; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; d – толщина окидной пленки.

Графическая зависимость сдвига порогового напряжения *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов показана на рис. 1.

Пороговое напряжение МОП-транзистора описывается параметром *VTO* расширенной части SPICE-модели микросхемы [13]. Его значение может быть верифицировано для конкретных изделий. Такой подход часто применяется для уточнения SPICE-моделей микросхем, для моделирования которых можно использовать многократные запуски симулятора [14–16]. Параметр *VTO* не может быть изменен во время процесса моделирования, поэтому для задач прогнозирования временны́х откликов его использование затруднено и целесообразно применение дополнительных источников напряжения в управляющих цепях транзисторов.

Анализ исходных данных показывает, что изменение порогового напряжения в *n*-канальных МОП-транзисторах, обусловленное образованием поверхностных дефектов на границе раздела кремний – диоксид кремния, поддается аналитическому описанию в виде суммы двух экспоненциальных составляющих ΔU_{na} и ΔU_{nb} (см. рис. 1). Это

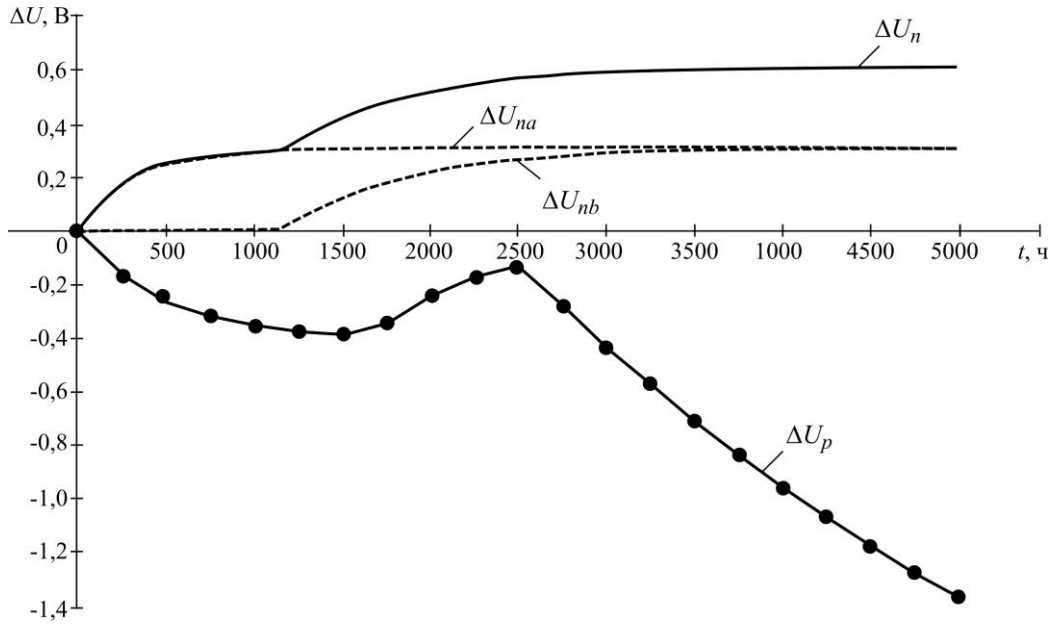


Рис. 1. Зависимость сдвига порогового напряжения ΔU_n для *n*-канальных и ΔU_p для *p*-канальных МОП-транзисторов от времени облучения
Fig. 1. Dependence of the threshold voltage shift ΔU_n for *n* channel and ΔU_p for *p* channel MOSFET on the irradiation time

упрощает реализацию процесса изменения порогового напряжения внутри SPICE-моделей микросхем, так как экспоненциальные источники входят в базовый функционал симуляторов. Для *p*-канальных транзисторов аналогичная зависимость не описывается библиотечными функциями.

Модификация SPICE-модели микросхемы 1564ЛЕ1 заключается в дополнении ее текстового файла строками, соответствующими описанию источников, отражающих изменения пороговых напряжений транзисторов в условиях ионизирующего излучения. Сдвиги пороговых напряжений задаются для каждого МОП-транзистора в отдельности: экспоненциальными источниками для *n*-канальных и программируемыми источниками, задаваемыми по дискретным отсчетам время – напряжение, для *p*-канальных МОП-транзисторов. Схемы подключения дополнительных источников, обеспечивающих изменения пороговых напряжений в моделях транзисторов, приведены на рис. 2. Источники напряжения ΔU подключаются последовательно в управляющую цепь $U_{упр}$ к выводам затвор и исток МОП-транзисторов VT.

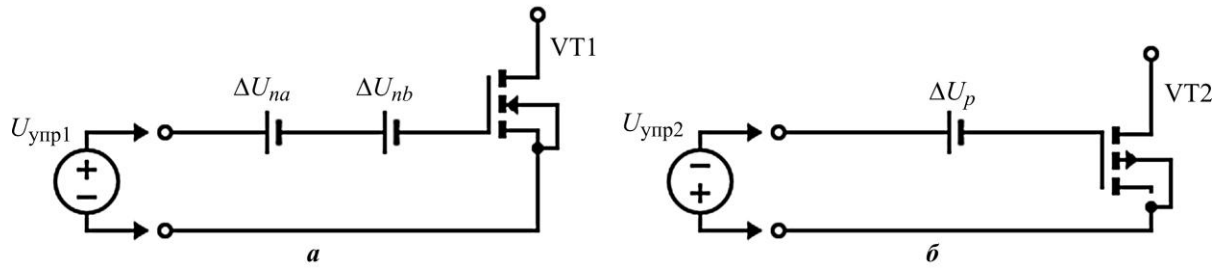


Рис. 2. Электрические схемы реализации сдвига пороговых напряжений *n*-канальных (*а*) и *p*-канальных (*б*) МОП-транзисторов в SPICE-модели микросхемы 1564ЛЕ1
Fig. 2. Electrical circuits for implementing the shift of threshold voltages of *n* channel (*a*) and *p* channel (*b*) MOSFET in the SPICE model of the 1564LE1 microcircuit

Изменение исходного текстового файла SPICE-модели микросхемы 1564ЛЕ1 [17] выполняли с помощью простой по структуре программы обработки, которая дополняет описания транзисторов однотипными строками описания источников напряжения. Фрагменты описания *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов в SPICE-модели до и после модификации представлены в таблице. Полный файл модифицированной модели дан в работе [18].

Фрагменты SPICE-модели микросхемы 1564ЛЕ1
Fragments of the SPICE model of the 1564LE1 microcircuit

Раздел	До модификации	После модификации
Дополнительные внутренние параметры	–	.PARAM expV2 = 0.306 .PARAM addV2 = {expV2} .PARAM expTau1 = 1.44E-7 .PARAM addTau1 = 3.5E-7 .PARAM Td1 = 200n .PARAM addTd1 = {{Td1} + 5.75E-7} .PARAM Td2 = 3u
Описание первого *p*-канального МОП-транзистора	M1 14 U336/OUT 2 VCC PCH L=3.63556E-006 W=4.75002E-005 AD=1.0902E-010 PD=3.85019E-005 AS=9.206E-011 PS=6.52642E-005	M1 14 Tww001 2 VCC PCH L=3.63556E-006 W=4.75002E-005 AD=1.0902E-010 PD=3.85019E-005 AS=9.206E-011 PS=6.52642E-005 V0013 U336/OUT Tww001 AC 0.0 PWL FILE=1.txt
Описание первого *n*-канального МОП-транзистора	M7 0V 0V 11 0V NCH L=2.84241E-006 W=0.000133647 AD=1.50882E-009 PD=0.000455609 AS=7.7048E-010 PS=0.000122822	M7 0V Tww007 11 0V NCH L=2.84241E-006 W=0.000133647 AD=1.50882E-009 PD=0.000455609 AS=7.7048E-010 PS=0.000122822 V0071 N4007 Tww007 AC 0.0 EXP (0.0 {addV2} {addTd1} {addTau1} {Td2} 0.0) V0072 0V N4007 AC 0.0 EXP (0.0 {expV2} {Td1} {expTau1} {Td2} 0.0)

Моделирование частотного отклика кольцевого генератора в условиях ионизирующего излучения. Моделирование проводили для кольцевого генератора, аналогичного генератору, используемому в натурном эксперименте. Генератор собран на базе одиннадцати инверторов 2ИЛИ-НЕ микросхемы 1564ЛЕ1 (рис. 3) [19]. Питание в схеме (+5 В) подавали скачком напряжения для запуска автоколебаний. Выход схемы нагружен на эквивалентную схему осциллографа, используемого в эксперименте. Для обеспечения технической реализуемости имитации 5000 ч эксперимента в едином запуске симулятора применяли сжатие временной оси: 2,5 мкс моделирования соответствовали 5000 ч эксперимента.

Полученная осциллограмма выходного напряжения кольцевого генератора в течение времени моделирования (2,5 нс) приведена на рис. 4. На ней указаны значения частот автоколебаний, соответствующие началу (8,5 МГц) и окончанию (5,5 МГц) имитации 5000 ч эксперимента. Первые 50 нс моделирования описывают переходной процесс в кольцевом генераторе.

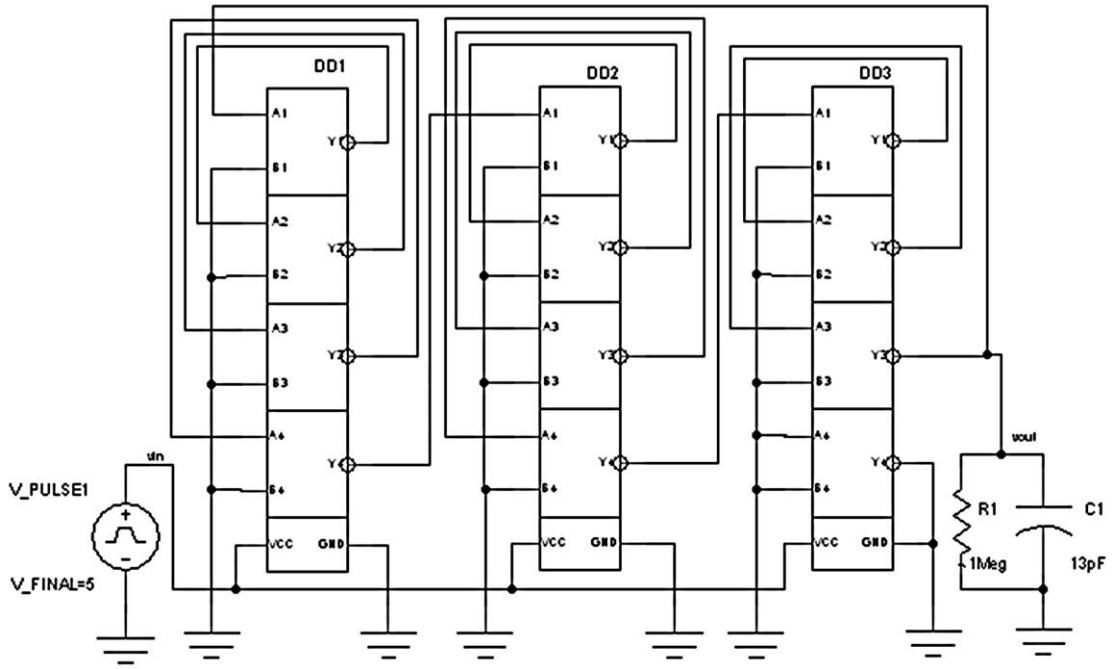


Рис. 3. Электрическая схема кольцевого генератора
Fig. 3. Electrical circuit of a ring generator

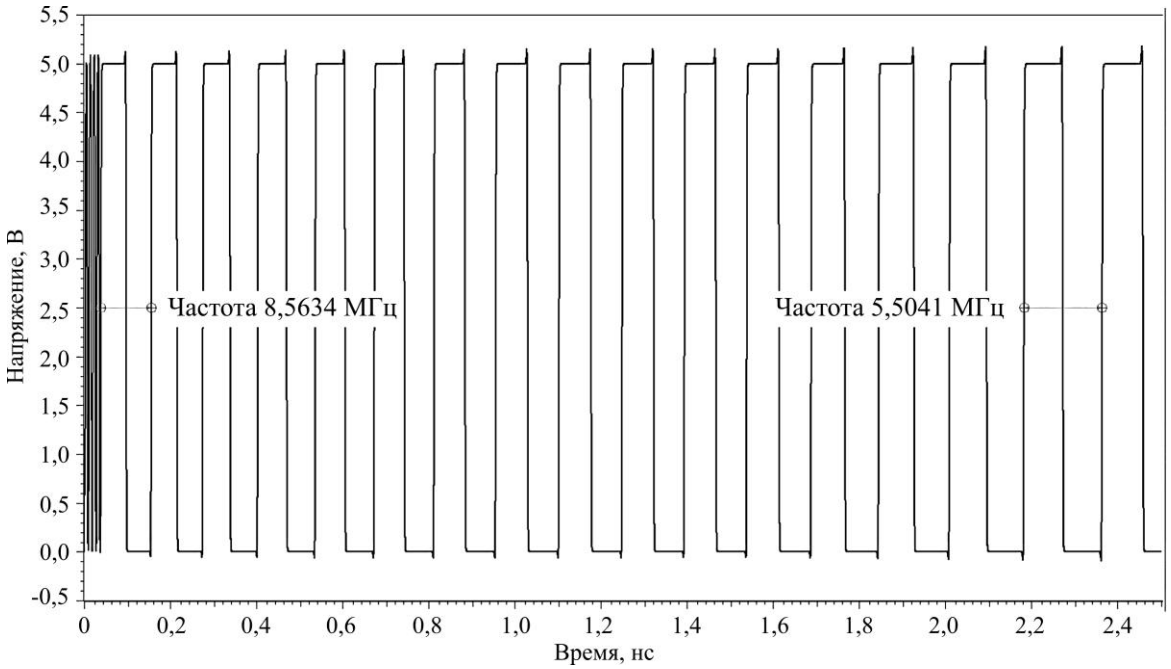


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения кольцевого генератора от времени моделирования
Fig. 4. Dependence of the output voltage of the ring generator on the simulation time

На рис. 5 показана зависимость частоты автоколебаний от времени ионизирующего излучения при температуре 25 °С, полученная расчетным и экспериментальным путем. Из рисунка видно, что средний темп уменьшения частоты кольцевого генератора составил примерно 500 Гц/ч. Отклонение расчетной зависимости относительно экспериментальной варьируется от 0 до 30 % в соответствии с временем моделирования (накопленной дозы).

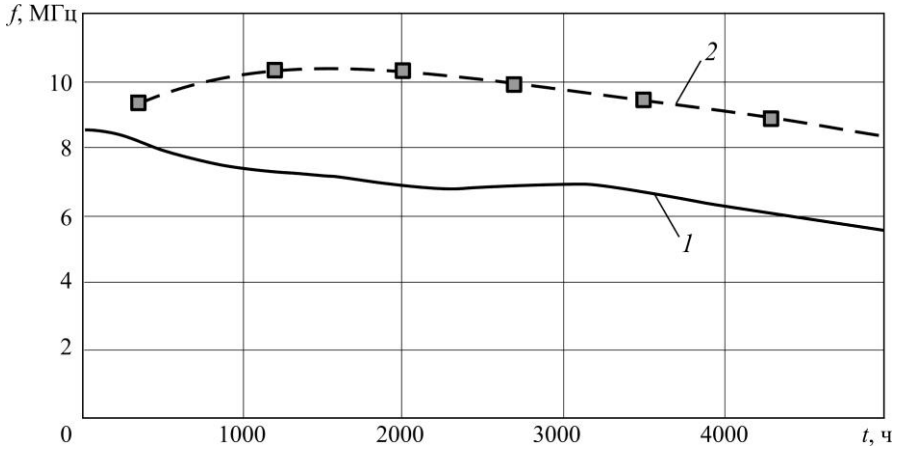


Рис. 5. Зависимость частоты от времени облучения: 1 – расчет; 2 – эксперимент [10]
Fig. 5. Dependence of the self-oscillation frequency of a ring oscillator from irradiation time: 1 – calculated; 2 – experimental [10]

Модифицированная SPICE-модель микросхемы позволяет примерно оценить порядок значения темпа изменения частоты кольцевого генератора, так как в реальных условиях эксплуатации на процесс деградации влияют и другие дестабилизирующие факторы. Тем не менее в ряде случаев этого достаточно для первоначальной оценки работоспособности проектируемого устройства на схемотехническом этапе.

Заключение. Используемый подход модификации SPICE-моделей КМОП-микросхем микронной технологии с помощью встраиваемых источников напряжения позволяет, во-первых, достаточно просто имитировать влияние процесса низкоинтенсивного облучения с постоянной мощностью дозы на электрические характеристики электронных устройств, во-вторых, технически реализовать имитацию тысяч часов эксперимента с электронными устройствами на КМОП-микросхемах в едином процессе моделирования с использованием сжатия временной оси.

В случае облучения с большей интенсивностью зависимость сдвига порогового напряжения от накопленной дозы, обусловленного зарядами в окисле и на поверхностных состояниях, будет иметь более сложную форму. Имитация сложных форм сдвига возможна путем комбинации библиотечных источников напряжения в системах SPICE-моделирования: импульсного, синусоидального, экспоненциального, программируемого. При необходимости учета токов утечки эквивалентная схема SPICE-модели МОП-транзистора должна быть дополнена источниками токов.

Модифицированная SPICE-модель микросхемы 1564ЛЕ1 [18] позволяет оценить на стадии схемотехнического проектирования ее отклик в устройствах, эксплуатируемых в условиях ионизирующего излучения космического пространства. Результаты моделирования частоты кольцевого генератора при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения показали, что характер зависимости частоты автоколебаний не противоречит экспериментальным данным.

Литература

1. ***Asadi F.*** Essential circuit analysis using LTspice. Cham: Springer, 2022. XI, 546 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09853-6

2. ***Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.*** Космическая электроника: в 2 кн. М.: Техносфера, 2021. Кн. 1. 695 с. Кн. 2. С. 700–1183.

3. ***Селецкий А. В., Шелепин Н. А.*** Оценка конструктивно-технологических возможностей повышения радиационной стойкости глубоко-субмикронных СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2012. № 1. С. 588–593. EDN: PCYJMR.

4. ***Зебрев Г. И.*** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции // Кафедра микро- и наноэлектроники НИЯУ МИФИ [Электронный ресурс]. 2010. URL: http://www.нано-е.рф/uploads/files/Zebrev_Radiacionnye_effekty.pdf (дата обращения: 24.04.2024).

5. ***Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.*** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. 3-е изд. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2017. 307 с.

6. ***Таперо 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.

7. ***Литовченко В. Г.*** Основы физики микроэлектронных систем металл – диэлектрик – полупроводник. Киев: Наукова думка, 1978. 316 с.

8. ***Скляр В. А.*** Моделирование эффектов низкоинтенсивного ионизирующего излучения в СБИС // Моделирование систем и процессов. 2014. № 2. С. 32–35. https://doi.org/10.12737/6084. – EDN: SXIFYL.

9. ***Gielen G., Hernandez-Corporales L., Rombouts P.*** Ring oscillators and their design methodology // Time-encoding VCO-ADCs for integrated systems-on-chip: Principles, architectures and circuits / G. Gielen et al. Cham: Springer, 2022. P. 47–71. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88067-5_4

10. ***Чжо Ко Вин.*** Применение ионизирующего излучения для ускоренных испытаний на надежность МОП интегральных микросхем: дис. … канд. техн. наук. М., 2013. 99 с.

11. ***Кузьминова А. В., Куликов Н. А., Попов В. Д.*** Исследование радиационных эффектов в МОП-транзисторе с *p*-каналом // ФТП. 2020. Т. 54. № 8. С. 729–733. https://doi.org/10.21883/FTP.2020.08.49643.9397. – EDN: MPNNPC.

12. ***Колосницын Б. С., Гапоненко Н. В.*** Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем: в 2 ч. Ч. 2: Расчет и проектирование полевых транзисторов: учеб. пособие. Минск: БГУИР, 2012. 96 с.

13. ***Fitzpatrick D.*** Analog design and simulation using OrCAD capture and PSpice. 2nd ed. Kidlington: Newnes, 2017. 452 p. https://doi.org/10.1016/C2017-0-01791-3

14. ***Ismail-Zade M. R.*** JFET and MOSFET SPICE models in a wide temperature range // Russ. Microelectron. 2021. Vol. 50. P. 486–490. https://doi.org/10.1134/S1063739721070064

15. ***Шумарин С. В., Фролова Т. Н., Богачев А. М.*** Методика идентификации параметров Spice-моделей КМОП-микросхем по температурным зависимостям их динамических характеристик // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 212–221. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-212-221. – EDN: GAROXQ.

16. ***Shumarin S. V., Bogachev A. M.*** A simple method to fit the parameters of SPICE models of transistor-level ICs in a temperature range // Russ. Microelectron. 2022. Vol. 51. Iss. 7. P. 602–605. https://doi.org/10.1134/S1063739722070101

17. SPICE-модель интегральной схемы 1564ЛЕ1 // ОАО «ОКБ «Экситон» [Электронный ресурс]. URL: https://okbexiton.ru/spice/1564le1.rar (дата обращения: 24.04.2024).

18. Модифицированная SPICE-модель интегральной схемы 1564ЛЕ1 // Pastebin [Электронный ресурс]. URL: https://pastebin.com/sCJMNsMn (дата обращения: 24.04.2024).

19. 1564ЛЕ1 // ОАО «ОКБ «Экситон» [Электронный ресурс]. URL: https://okbexiton.ru/pdf/mc1564le1.pdf (дата обращения: 24.04.2024).

Статья поступила в редакцию 19.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.01.2024 г.; принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Шумарин Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, 600014, г. Владимир, пр-т Строителей, 3/7), sergey.shumarin@vlsu.ru

Фролова Тамара Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, 600014, г. Владимир, пр-т Строителей, 3/7), frolova@vlsu.ru

References

1. Asadi F. *Essential circuit analysis using LTspice.* Cham, Springer, 2022. xi, 546 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09853-6

2. Belous A. I., Solodukha V. A., Shvedov S. V. *Space electronics.* In 2 books. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2021. Book 1, 695 p. Book 2, pp. 700–1183. (In Russian).

3. Seleckiy A. V., Shelepin N. A. Appraisal of constructive-technological capabilities improvement of radiation hardening deep submicron VLSI. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES),* 2012, no. 1, pp. 588–593. (In Russian). EDN: PCYJMR.

4. Zebrev G. I. Radiation effects in silicon integrated circuits of high degree of integration. *Kafedra mikro- i nanoelektroniki NIYaU MIFI.* 2010. (In Russian). Available at: http://www.xn----7sbq3abg.xn--p1ai/uploads/files/Zebrev_Radiacionnye_effekty.pdf (accessed: 24.04.2024).

5. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiation effects in silicon integrated circuits of space-related application.* 3rd ed. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2017. 307 p. (In Russian).

6. 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

7. Litovchenko V. G. *Fundamentals of physics of microelectronic systems metal – dielectric – semiconductor.* Kyiv, Naukova dumka Publ., 1978. 316 p. (In Russian).

8. Sklyar V. A. Modeling the effects of low-intensity ionizing radiation in VLSI. *Modelirovanie sistem i protsessov = Modeling of Systems and Processes,* 2014, no. 2, pp. 32–35. (In Russian). https://doi.org/10.12737/6084. – EDN: SXIFYL.

9. Gielen G., Hernandez-Corporales L., Rombouts P. Ring oscillators and their design methodology. *Time-encoding VCO-ADCs for integrated systems-on-chip: Principles, architectures and circuits,* by G. Gielen et al. Cham, Springer, 2022, pp. 47–71. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88067-5_4

10. Kyaw Ko Win. *Ionizing radiation application for accelerated reliability tests of MOS integrated circuits,* diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Moscow, 2013. 99 p. (In Russian).

11. Kuzminova A. V., Kulikov N. A., Popov V. D. Investigation into radiation effects in a *p*-channel MOS transistor. *Semiconductors,* 2020, vol. 54, iss. 8, pp. 877–881. https://doi.org/10.1134/S1063782620080138

12. Kolosnitsyn B. S., Gaponenko N. V. *Semiconductor devices and elements of integrated circuits,* in 2 parts. Part 2. *Calculation and design of field-effect transistors,* study guide. Minsk, BSUIR, 2012. 96 p. (In Russian).

13. Fitzpatrick D. *Analog design and simulation using OrCAD capture and PSpice.* 2nd ed. Kidlington, Newnes, 2017. 452 p. https://doi.org/10.1016/C2017-0-01791-3

14. Ismail-Zade M. R. JFET and MOSFET SPICE models in a wide temperature range. *Russ. Microelectron.*, 2021, vol. 50, pp. 486–490. https://doi.org/10.1134/S1063739721070064

15. Shumarin S. V., Frolova T. N., Bogachev A. M. Technique for identification of CMOS ICs Spice models parameters by temperature dependences of their dynamic characteristics. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics,* 2023, vol. 28, no. 2, pp. 212–221. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-212-221. – EDN: GAROXQ.

16. Shumarin S. V., Bogachev A. M. A simple method to fit the parameters of SPICE models of transistor-level ICs in a temperature range. *Russ. Microelectron.,* 2022, vol. 51, iss. 7, pp. 602–605. https://doi.org/10.1134/S1063739722070101

17. SPICE model of the 1564LE1 integrated circuit. *OAO "OKB "Eksiton".* (In Russian). Available at: https://okbexiton.ru/spice/1564le1.rar (accessed: 24.04.2024).

18. Modified SPICE model of the 1564LE1 integrated circuit. *Pastebin.* Available at: https://pastebin.com/sCJMNsMn (accessed: 24.04.2024).

19. 1564LE1. *OAO "OKB "Eksiton".* (In Russian). Available at: https://okbexiton.ru/pdf/mc1564le1.pdf (accessed: 24.04.2024).

The article was submitted 19.12.2023; approved after reviewing 29.01.2024;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Sergei V. Shumarin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronics, Instrumentation and Biotechnical Systems Department, Vladimir State University (Russia, 600014, Vladimir, Stroiteley ave., 3/7), sergey.shumarin@vlsu.ru

Tamara N. Frolova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Electronics, Instrumentation and Biotechnical Systems Department, Vladimir State University (Russia, 600014, Vladimir, Stroiteley ave., 3/7), frolova@vlsu.ru

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

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА
INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Научная статья
УДК 631.38
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-525-538
EDN: HFXBTD

Разработка устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения

М. П. Маслаков, О. В. Лыков

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия

lykov.oleg89@gmail.com

Аннотация. Для обеспечения бесперебойного питания дорогостоящего сложного оборудования и измерительных приборов на предприятиях используются источники резервного питания. Обычно в качестве таких источников применяются аккумуляторные батареи, постоянное напряжение от которых преобразуется в переменное напряжение с помощью инвертора. Однако такие источники не могут обеспечить высокое качество выходного переменного напряжения. Это связано с тем, что полученная форма напряжения отличается от синусоидальной, в результате напряжение содержит большое число гармоник, что сказывается на качестве работы оборудования на предприятии. В работе предложено устройство для получения высококачественного переменного синусоидального напряжения из переменного напряжения произвольной формы. Разработана принципиальная электрическая схема устройства. Проведено ее моделирование и исследование. Приведен разработанный алгоритм работы устройства. Создана модель устройства в соответствии с разработанным алгоритмом и проведено ее моделирование в программе Micro-Cap 12. Показано, что устройство позволяет формировать на его выходе переменное напряжение, форма которого максимально приближена к синусоидальной, и искажения не превышают 3 %.

Ключевые слова: микроконтроллер, инвертор, коммутатор, транзистор, выпрямитель, фильтр, система управления, силовая часть

Для цитирования: Маслаков М. П., Лыков О. В. Разработка устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения. Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 525–538. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-525-538. – EDN: HFXBTD

© М. П. Маслаков, О. В. Лыков, 2024

Original article

Development of a device for obtaining high-quality sinusoidal alternating voltage

M. P. Maslakov, O. V. Lykov

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

lykov.oleg89@gmail.com

Abstract. To ensure uninterrupted power supply to expensive sophisticated equipment and measuring instruments, enterprises use backup power supplies. Typically, such sources can be rechargeable batteries, the direct voltage from which is converted into alternating (AC) voltage using an inverter. However, such sources cannot provide high quality AC output voltage. This is due to the fact that the resulting voltage waveform differs from the sinusoidal one; as a result, the voltage contains a large number of harmonics, which affects the quality of operation of the equipment in the enterprise. In this work, a device for obtaining high-quality sinusoidal AC voltage from an AC voltage of arbitrary shape is proposed. The schematic circuit diagram of the device has been developed. Its simulation and study were carried out. The developed operating algorithm of the device is provided. A model of device is created in accordance with developed algorithm and its simulation in Micro-Cap 12 is carried out. It was demonstrated that the developed device makes it possible to obtain at its output the AC voltage with waveform maximally close to sinusoidal and with distortions not exceeding 3 %.

Keywords: microcontroller, inverter, switch, transistor, rectifier, filter, control system, power section

For citation: Maslakov M. P., Lykov O. V. Development of a device for obtaining high-quality sinusoidal alternating voltage. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 525–538. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-525-538. – EDN: HFXBTD.

Введение. Форма переменного напряжения, питающего оборудование, может отличаться от синусоидальной, содержать искажения, например, если это напряжение получено от источника резервного питания. Это приводит к нарушению технологического процесса производимой продукции. Наибольшее допустимое отклонение формы напряжения сети от синусоидальной в соответствии со справочными данными составляет 8 % [1]. Для некоторых измерительных оборудования и приборов такие искажения сетевого напряжения значительны. Поэтому актуальной задачей силовой электроники является повышение качества напряжения сети [2–4].

В настоящей работе исследуется устройство для получения высококачественного переменного синусоидального напряжения из переменного напряжения произвольной формы.

Алгоритм работы устройства. Принципиальная электрическая схема разработанного устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения заданного уровня из переменного напряжения произвольной формы показана на рис. 1.

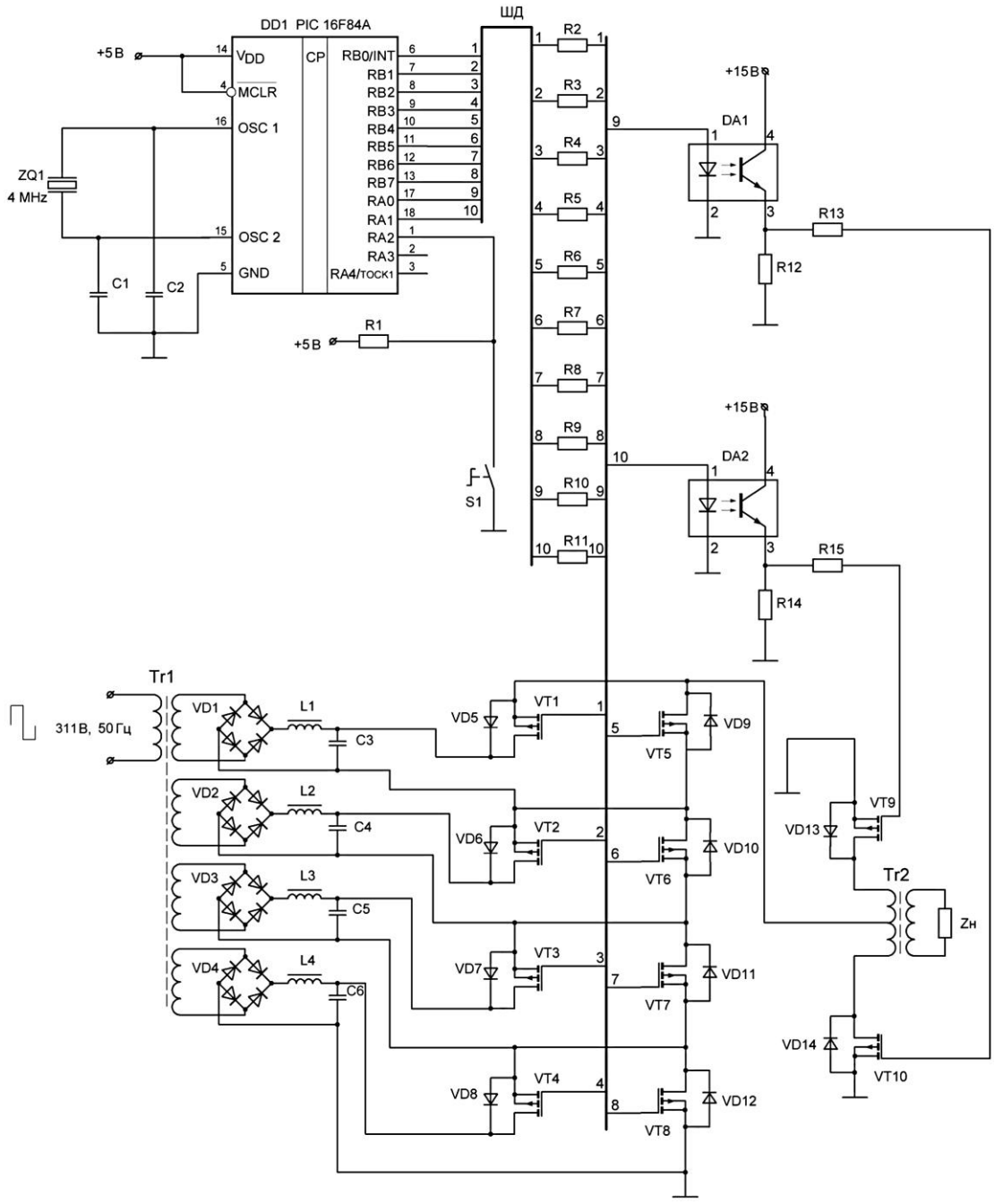


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения
Fig. 1. The fundamental electrical circuit of the developed device for obtaining high-quality sinusoidal alternating voltage

Искажения переменного напряжения часто возникают в инверторах и регуляторах напряжения, при коммутации силовых ключей, таких как тиристоры. Фильтрокомпенсирующие устройства способны уменьшать искажения напряжения. Однако на сегодняшний день нет универсального подобного устройства. Существующие устройства работают по принципу уменьшения реактивного сопротивления нагрузки.

Алгоритм работы разработанного устройства показан на рис. 2.

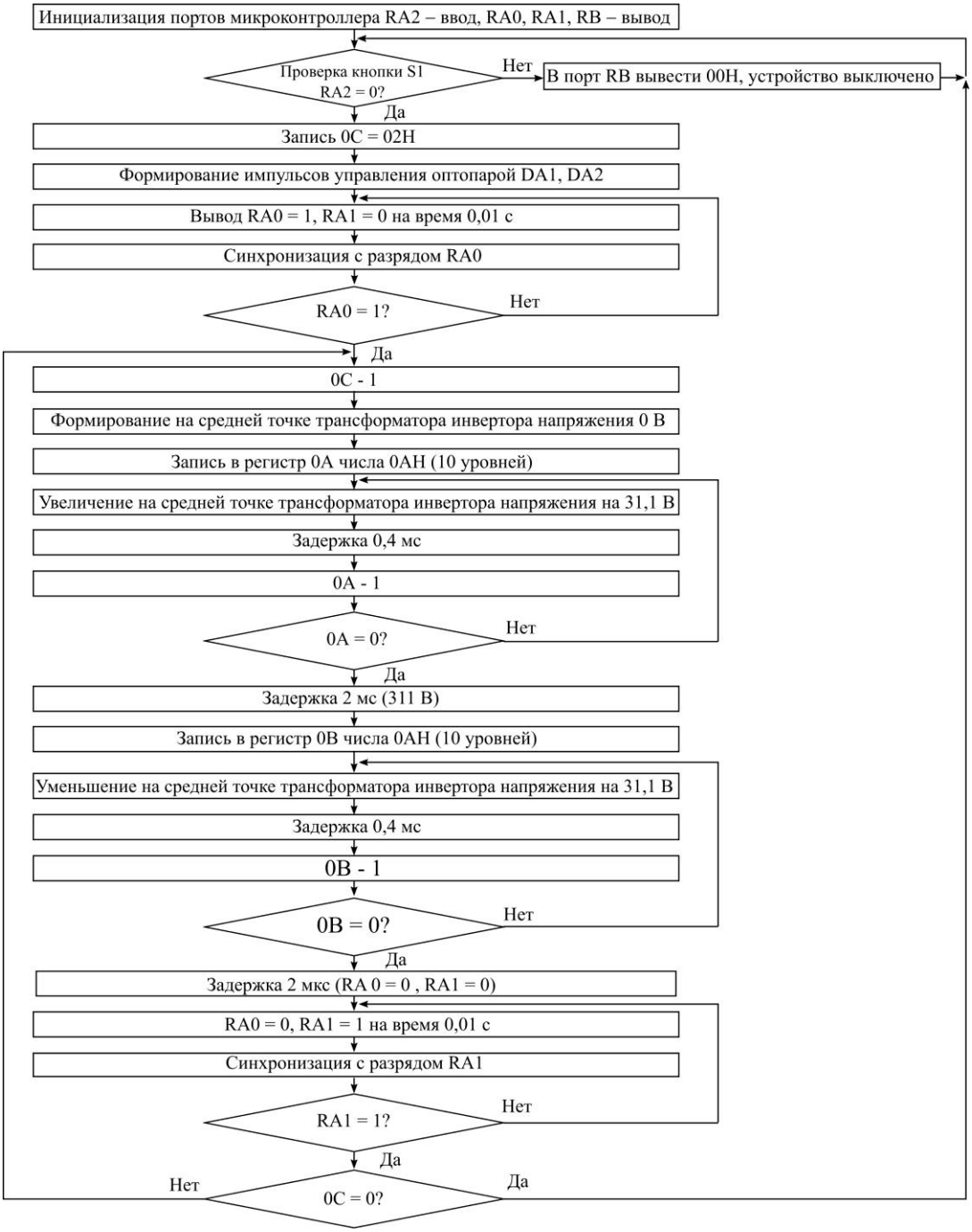


Рис. 2. Алгоритм работы разработанного устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения

Fig. 2. Developed algorithm of the device operation for obtaining high-quality sinusoidal alternating voltage

Аналоги данного устройства позволяют получать несколько ступенек выходного переменного напряжения, что дает возможность свести искажения напряжения на нагрузке до 8 %. Каждая ступенька выходного напряжения получается коммутацией обмотки трансформатора. Однако не существует коммутатора, позволяющего из четырех обмоток (выходных напряжений) трансформатора получать 11 уровней напряжения. Уникальность и универсальность устройства заключается в возможности формировать

на его выходе переменное напряжение, форма которого максимально приближена к синусоидальной, искажения не превышают 3 %.

Рассмотрим работу алгоритма. В блоке «Инициализация» происходит настройка портов микроконтроллера на ввод и вывод. Необходимо настроить разряд RA2 порта RA микроконтроллера на ввод, так как к этому разряду подключена кнопка S1. Разряды RA0, RA1 порта RA и весь порт RB необходимо настроить на вывод, так как здесь формируются логические уровни напряжения для управления работой схемы коммутатора и инвертора напряжения. В случае если кнопка S1 не нажата, к разряду RA2 микроконтроллера будет приложена логическая единица (уровень напряжения 5В), микроконтроллер прочитает разряд RA2 порта RA и выведет в порт RB шестнадцатеричное число 00H (в двоичной системе это соответствует значению 00000000B) – устройство выключено. До тех пор пока кнопка S1 не будет нажата, в порт RB микроконтроллера будет выводиться число 00H. При нажатии кнопки S1 к разряду RA2 микроконтроллера будет приложен логический ноль (уровень напряжения 0 В), микроконтроллер прочитает разряд RA2 порта RA и по команде безусловного перехода на необходимую метку будет выполняться программа – устройство включено.

В алгоритме регистр 0C – ячейка памяти, в которую записано число 02H. Это число равно числу полуволн формируемой синусоиды, так как у синусоиды две полуволны – положительная и отрицательная. В соответствии с алгоритмом при формировании импульса управления оптопарой DA1 в разряд RA0 микроконтроллера выведена логическая единица на время 0,01 с, тогда в нагрузке будет формироваться положительная полуволна переменного синусоидального напряжения. В алгоритме создан счетчик формируемых в нагрузке за счет управления коммутатором уровней напряжений (31,1; 62,2; 93,3; 124,4; 155,5; 186,6; 217,7; 248,8; 279,9; 311,0 В), в регистр 0A записано число 0AH, равное количеству уровней (10 уровней). Аналогично – с регистром 0B при формировании отрицательной полуволны напряжения на нагрузке.

После уменьшения значения в регистре 0C на единицу и формирования положительной полуволны переменного напряжения на нагрузке следует проверить, равно ли значение регистра 0C числу 00H. Если нет, то следует перейти к формированию отрицательной полуволны напряжения на нагрузке. Когда значение регистра 0C будет равно 00H, необходимо перейти в начало и проверить кнопку S1. Аналогично с регистрами 0A и 0B, которые уменьшаются на единицу при формировании каждого уровня напряжения на нагрузке, до тех пор пока они не будут равны 00H. Так как необходимо сформировать напряжение от 0 до 311 В (10 ступенек), число, записанное в этих регистрах, – 10 в шестнадцатеричной системе. При этом регистр 0A участвует, когда формируется положительная полуволна напряжения на нагрузке, а регистр 0B – когда отрицательная. Уменьшение значения каждого из этих регистров – это декремент: сколько раз прокрутились, столько раз уменьшили значение регистра 0A или регистра 0B на единицу. Данные в эти регистры записаны программно и сохранены, обнуление каждого из этих регистров означает, что сформированы две полуволны (положительная и отрицательная). При возврате в начало программы данные регистров 0A, 0B, представляющие собой числа, записываются заново.

Схема разработанного устройства адаптирована для получения переменного синусоидального напряжения амплитудой 311 В и частотой 50 Гц. Однако есть возможность получить любое значение амплитуды и частоты переменного синусоидального напряжения на выходе устройства. Рассмотрим основные узлы устройства.

Микросхема DD1 – это микроконтроллер PIC 16F84A, который является основным элементом системы управления силовой частью. В соответствии с разработанным алго-

ритмом уровни напряжений с выхода порта RB и разрядов RA0, RA1 порта RA микроконтроллера по шине данных поступают на схему коммутатора и инвертора напряжения. На разрядах RA0, RA1 микроконтроллера формируются логические уровни напряжения управления оптопарой DA1 и DA2. При этом время действия высокого логического уровня на разряде RA0 микроконтроллера формирует положительную полуволну переменного напряжения на выходе инвертора напряжения, который собран на транзисторах VT9, VT10 [5, 6]. Соответственно, время действия высокого логического уровня на разряде RA1 микроконтроллера формирует отрицательную полуволну переменного напряжения на выходе инвертора напряжения. Оптопара DA1, DA2 осуществляет гальваническую развязку системы управления и силовой части устройства. Трансформатор Tr1 предназначен для получения необходимых уровней напряжения на входе разработанного коммутатора напряжения. На вход трансформатора подается переменное напряжение произвольной формы и частоты, на выходе трансформатор содержит четыре гальванически развязанные обмотки. Каждая выходная обмотка соотносится по напряжению друг с другом как 1:2:3:4. Для формирования выходного напряжения 311 В на выпрямитель VD4 с обмотки трансформатора поступает такое напряжение, чтобы на выходе выпрямителя VD4 было напряжение 31,1 В [7; 8, с. 56–58]. Таким образом, необходимо получить напряжения на выходе VD4 = 31,1 В, VD3 = 62,2 В, VD2 = 93,3 В, VD1 = 124,4 В. Тогда сумма всех этих напряжений будет равна 311 В.

Для обеспечения высококачественного синусоидального переменного напряжения поставлена задача получить на средней точке трансформатора инвертора Tr2 11 уровней напряжения (от 0 до 311 В). Эта задача решается путем разработки схемы коммутатора напряжения, собранного на транзисторах VT1 – VT8. Инвертор напряжения собран на транзисторах VT9, VT10. В соответствии с разработанным алгоритмом для формирования необходимой частоты синусоидального выходного напряжения включение транзисторов коммутатора напряжения синхронизируется с появлением высокого логического уровня на разряде RA0 микроконтроллера. В результате формируется положительная полуволна переменного напряжения. В момент появления на разряде RA0 микроконтроллера низкого логического уровня (окончание положительной полуволны,

Таблице 1

Последовательность включения транзисторов коммутатора напряжения

Table 1

The sequence of turning on the transistors of the voltage commutator

Постоянное напряжение, В	Источник постоянного напряжения	Транзисторы (открыты)	Код порта RB микроконтроллера	Время действия кода, мс
0	Не подключен	VT5, VT6, VT7, VT8	F0H	2
31,1	VD4	VT4, VT5, VT6, VT7	78H	0,4
62,2	VD3	VT3, VT5, VT6, VT8	B4H	0,4
93,3	VD2	VT2, VT5, VT7, VT8	D2H	0,4
124,4	VD1	VT1, VT6, VT7, VT8	E1H	0,4
155,5	VD1, VD4	VT1, VT4, VT6, VT7	69H	0,4
186,6	VD1, VD3	VT1, VT3, VT6, VT8	A5H	0,4
217,7	VD1, VD2	VT1, VT2, VT7, VT8	C3H	0,4
248,8	VD1, VD2, VD4	VT1, VT2, VT4, VT7	4BH	0,4
279,9	VD1, VD2, VD3	VT1, VT2, VT3, VT8	87H	0,4
311,0	VD1, VD2, VD3, VD4	VT1, VT2, VT3, VT4	0FH	2

переход через ноль) проходит весь цикл коммутации напряжения от 0 до 311 В и от 311 до 0 В. В момент перехода синусоидального переменного напряжения через ноль отсчитывается задержка 2 мкс, затем включение транзисторов коммутатора напряжения синхронизируется с появлением высокого логического уровня на разряде RA1 микроконтроллера. В результате формируется отрицательная полуволна переменного напряжения. В момент появления на разряде RA1 микроконтроллера низкого логического уровня (окончание отрицательной полуволны, переход через ноль) проходит весь цикл коммутации напряжения от 0 до –311 В и от –311 до 0 В. В табл. 1 приведена последовательность включения транзисторов коммутатора напряжения.

Моделирование. В соответствии с разработанным алгоритмом работы устройства создана его модель и проведено моделирование в программе Micro-Cap 12. На вход устройства подается переменное напряжение прямоугольной формы амплитудой 311 В и частотой 50 Гц (рис. 3). Если пропустить такое напряжение через фильтр нижних частот, синусоидальная форма переменного напряжения без искажений не получится [9, с. 35–37; 10] (рис. 4). Задача получения синусоидальной формы напряжения без искажений успешно решается с помощью разработанного устройства.

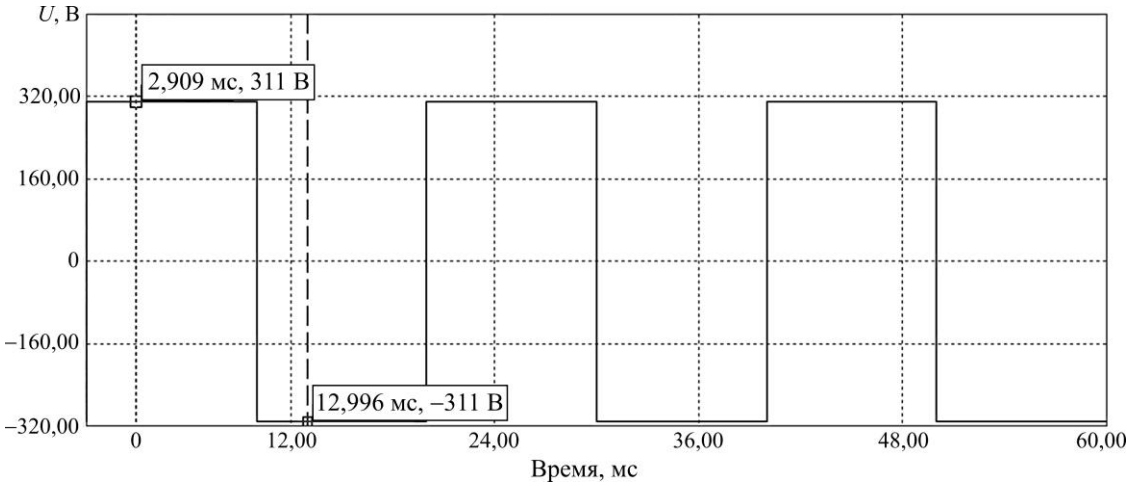


Рис. 3. Форма, амплитуда и частота входного напряжения
Fig. 3. Shape, amplitude and frequency of the input voltage

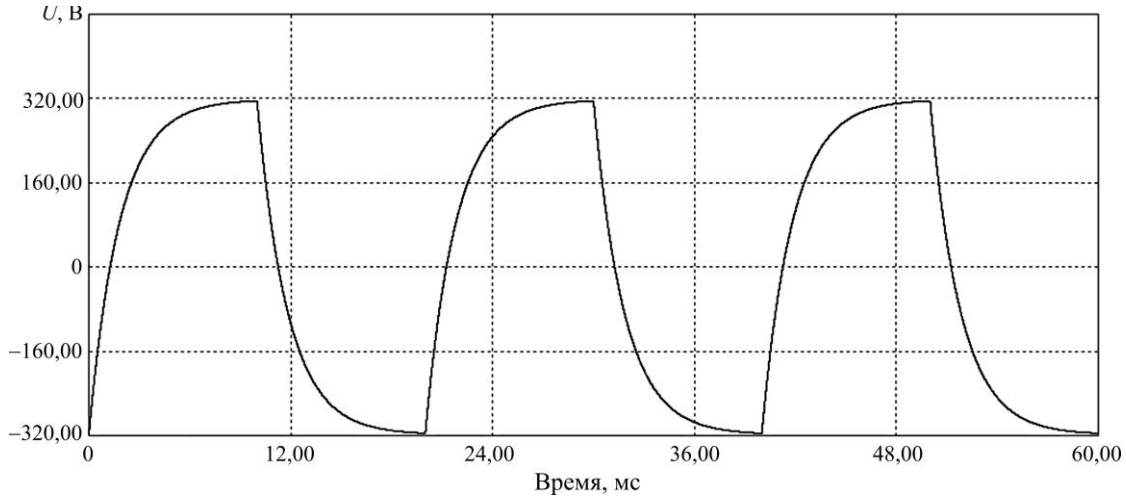


Рис. 4. Форма, амплитуда и частота входного напряжения при пропускании его через фильтр нижних частот
Fig. 4. Shape, amplitude and frequency of the input voltage when passing it through a low-pass filter

На рис. 5 показано напряжение управления транзисторами VT9, VT10 инвертора напряжения, на рис. 6 – напряжение на выходе инвертора напряжения. Как можно заметить, получено 11 уровней напряжения (от 0 до 311 В). Пропуская такое напряжение через фильтр нижних частот, получаем высококачественное синусоидальное переменное напряжение (рис. 7).

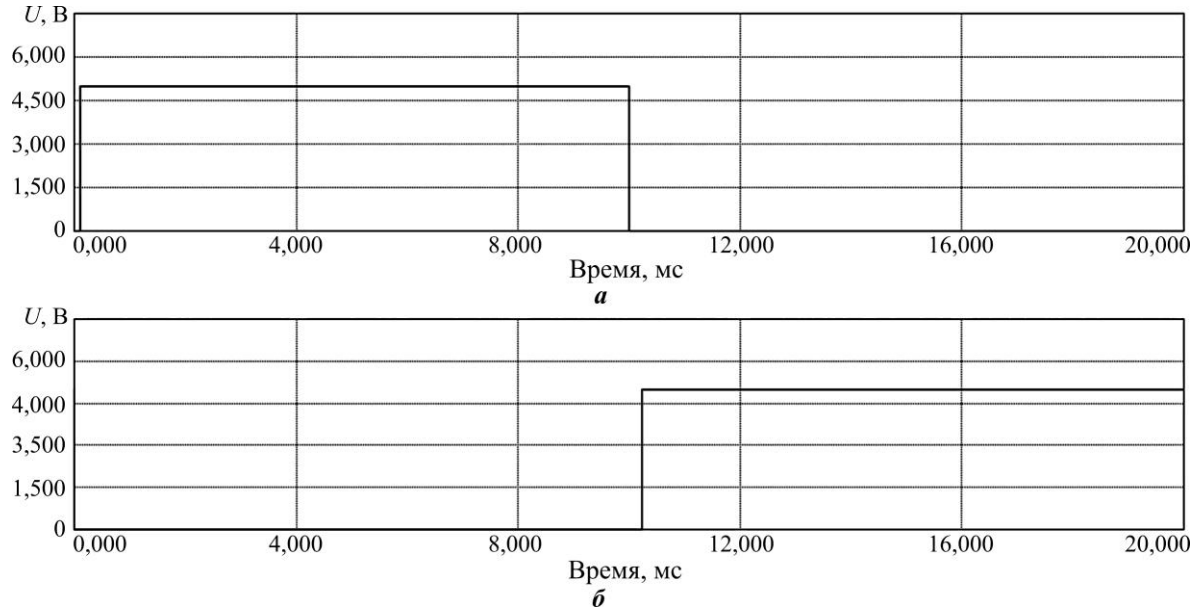


Рис. 5. Напряжение управления транзисторами VT9 (*а*), VT10 (*б*) инвертора напряжения
Fig. 5. Control voltage of transistors VT9 (*a*), VT10 (*b*) of the voltage inverter

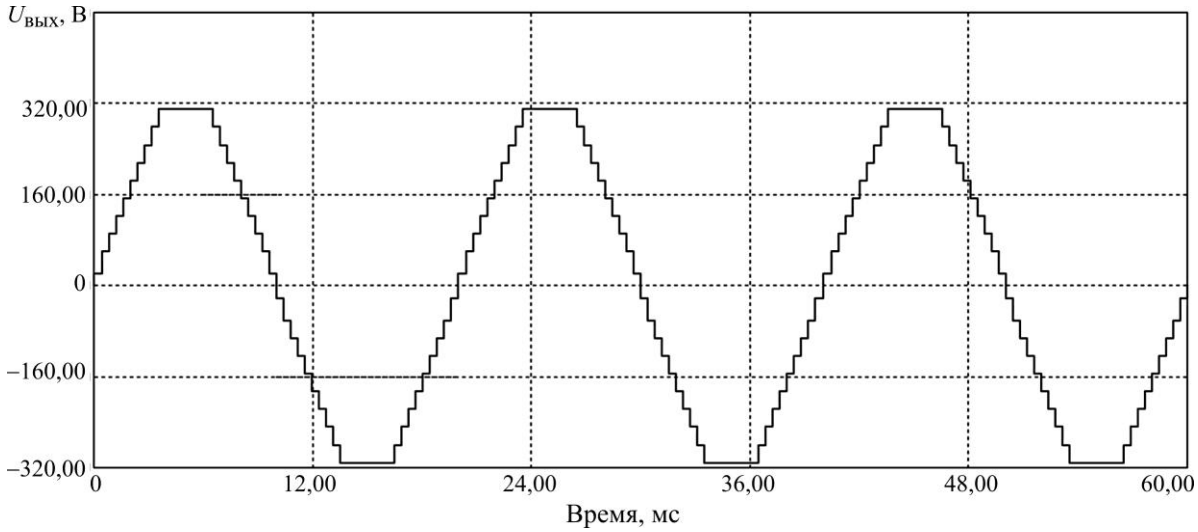


Рис. 6. Напряжение на выходе инвертора напряжения
Fig. 6. Voltage at the output of the voltage inverter

В качестве фильтра нижних частот применим фильтр Баттерворта второго порядка. У такого фильтра максимально плоская и монотонно убывающая с ростом частоты АЧХ. На рис. 8 показана схема простого фильтра нижних частот второго порядка.

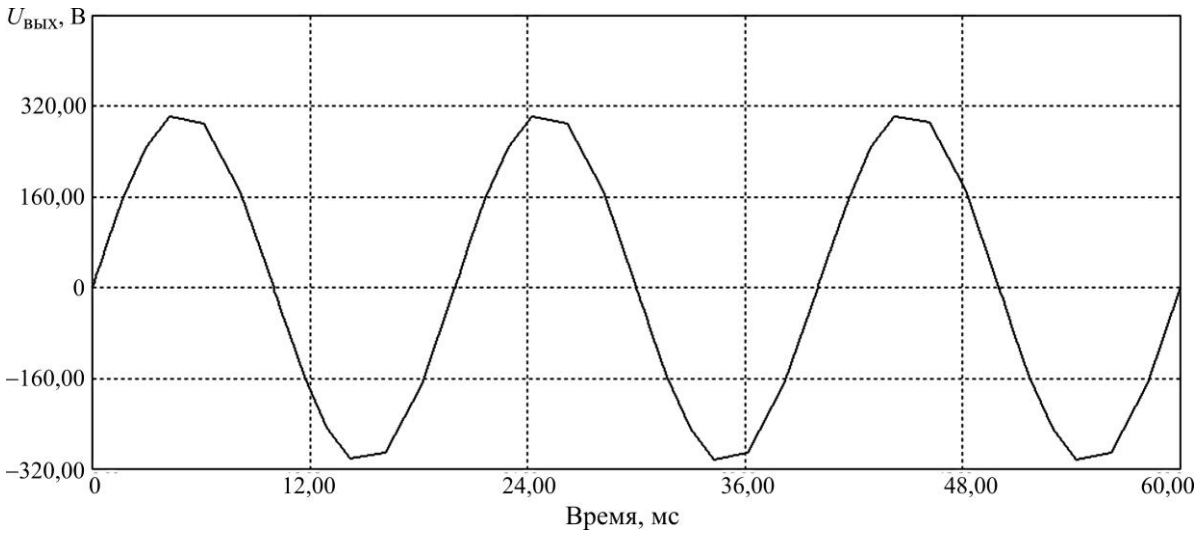


Рис. 7. Высококачественное синусоидальное переменное напряжение
Fig. 7. High quality sinusoidal AC voltage

Для расчета схемы фильтра примем: частота напряжения сети f_c = 50 Гц; емкость конденсатора C_1 = 10 мкФ. Рассчитаем значения элементов фильтра L_1, R_1 по формулам

$$L_1 = \frac{1}{C_1(2\pi f_c)^2} = \frac{1}{10\cdot 10^{-6}(2\pi 50)^2} = 1{,}014\ \text{Гн}, \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{2}C_1 2\pi f_c} = \frac{1}{\sqrt{2}\cdot 10\cdot 10^{-6}\cdot 2\pi 50} = 225{,}2\ \text{Ом}.$$

Степень сходства полученного переменного напряжения с синусоидальным можно определить, рассчитав коэффициент гармоник $K_г$. Это позволит определить количественно в процентном выражении степень нелинейных искажений полученного переменного напряжения. С помощью моделирования в программе OrCad получаем спектр разложения напряжения на нагрузке (рис. 9) в гармонический ряд (рис. 10) для входного прямоугольного напряжения (см. рис. 3). Данный гармонический ряд содержит только нечетные гармоники (табл. 2).

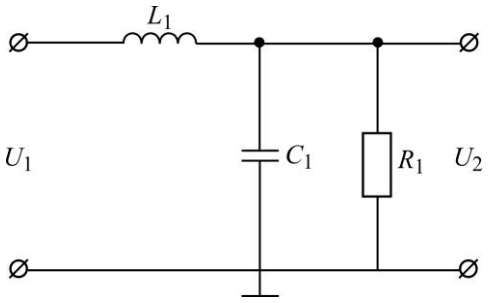


Рис. 8. Схема простого фильтра нижних частот второго порядка
Fig. 8. The scheme of a simple second-order low-pass filter

Как можно заметить, основная гармоника имеет амплитуду 311 В. Рассчитаем коэффициент гармоник полученного напряжения на нагрузке при входном прямоугольном напряжении по формуле

$$K_г = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_9^2 + U_{11}^2 + U_{13}^2 + U_{15}^2 + U_{17}^2 + U_{19}^2 + U_{21}^2}}{U_1}\cdot 100\%.$$

Подставляя в данную формулу числовые значения, получаем, что переменное напряжение на нагрузке имеет искажение 2,186 %.

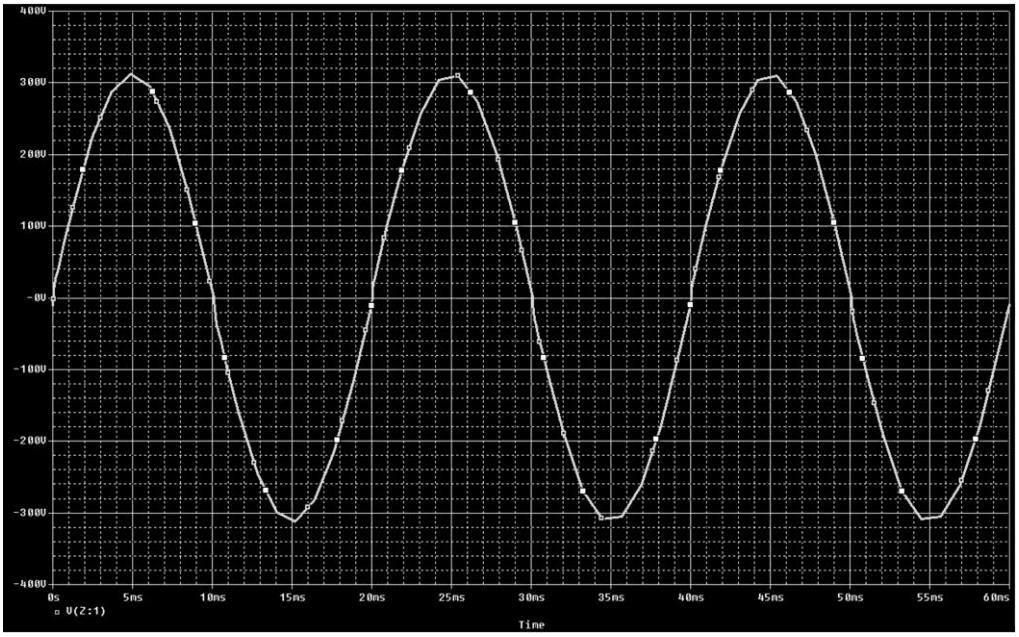


Рис. 9. Синусоидальное переменное напряжение на нагрузке
Fig. 9. Sinusoidal AC voltage at the load

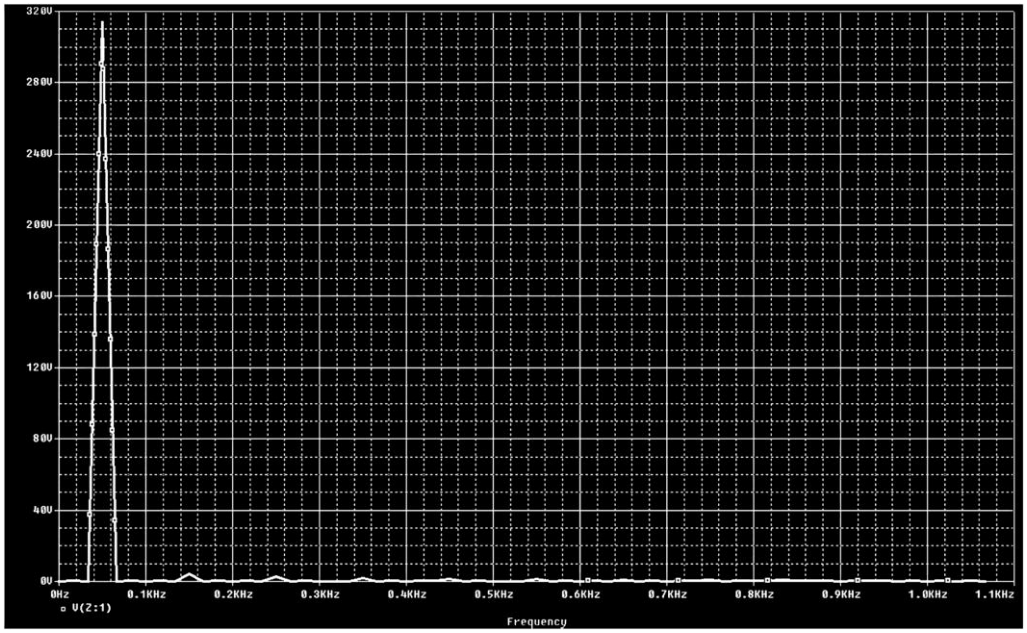


Рис. 10. Разложение полученного напряжения на нагрузке в гармонический ряд
Fig. 10. Decomposition of the obtained voltage at the load into a harmonic series

Таблица 2

Амплитуда гармоник полученного выходного напряжения при входном прямоугольном напряжении

Table 2

Amplitude of harmonics of the obtained output voltage, with input rectangular voltage

Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда, В
1	50	311,0
3	150	5,0
5	250	3,0
7	350	2,0
9	450	1,8
11	550	1,5
13	650	1,3
15	750	1,0
17	850	0,5
19	950	0,2
21	1050	0,1

Подадим на вход разработанного устройства переменное напряжение, имеющее форму, показанную на рис. 11. Разложим полученное выходное синусоидальное напряжение на нагрузке в каждом случае в гармонический ряд и по формуле (1) рассчитаем коэффициент гармоник $K_г$. Приведем результаты исследования:

Форма входного напряжения	***$K_г$, %***
Прямоугольное напряжение (см. рис. 8)	2,186
Первое напряжение (см. рис. 11, *а*)	2,685
Второе напряжение (см. рис. 11, *б*)	2,426
Третье напряжение (см. рис. 11, *в*)	2,982
Четвертое напряжение (см. рис. 11, *г*)	1,526

Таким образом, худший результат получен при входном напряжении, показанном на рис. 11, *в*.

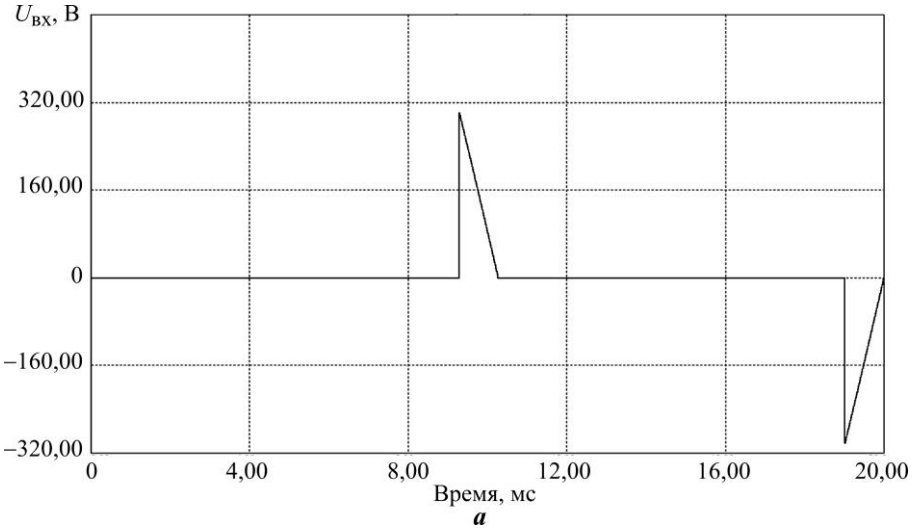


Рис. 11. Форма, амплитуда и частота первого напряжения (*а*), поданного на вход устройства
Fig. 11. Shape, amplitude and frequency of the first voltage (*a*) applied to device input

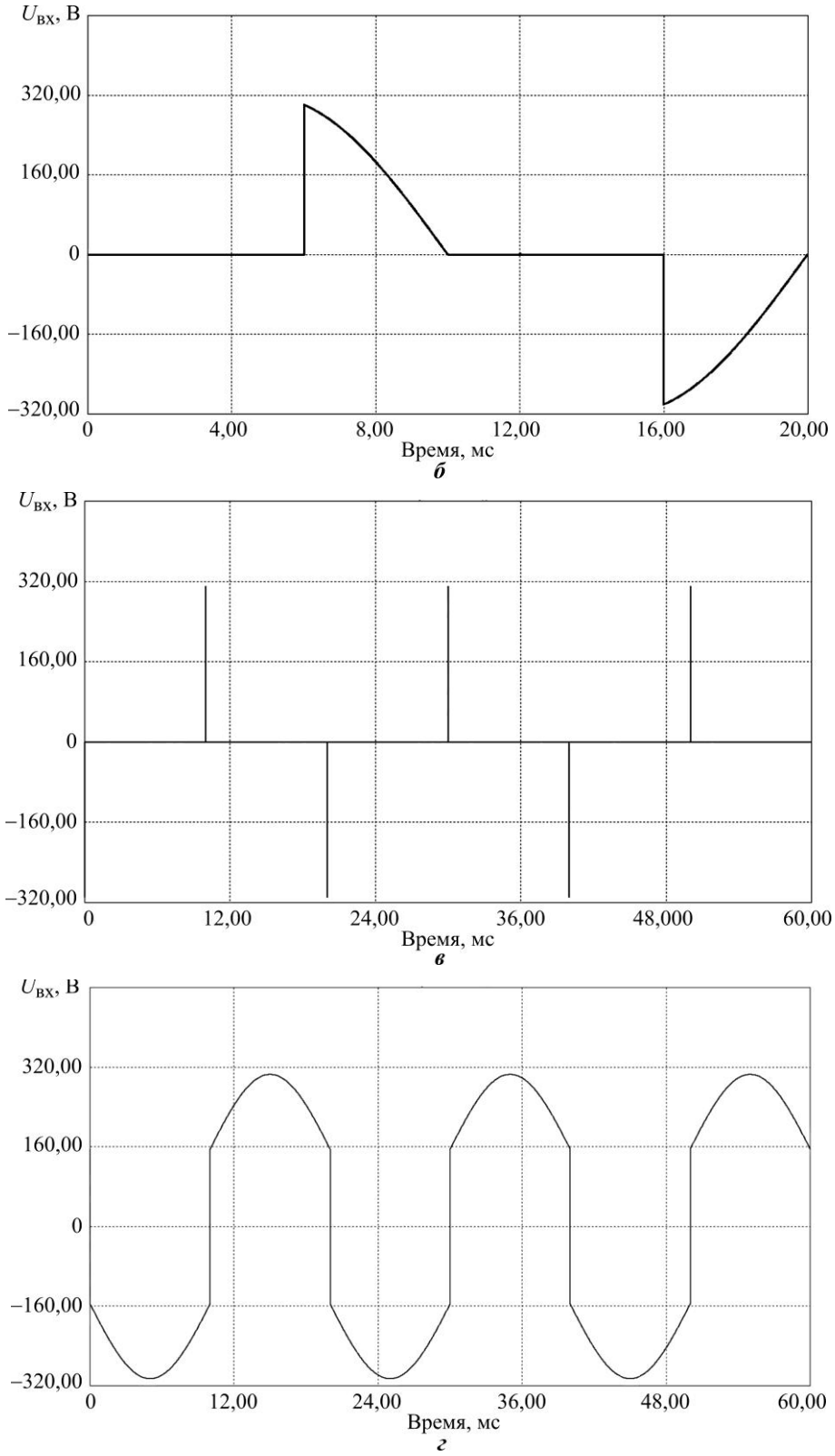


Рис. 11. Форма, амплитуда и частота второго (*б*), третьего (*в*) и четвертого (*г*) напряжений, поданных на вход устройства

Fig. 11. Shape, amplitude and frequency of the second (*b*), third (*c*) and fourh (*d*) voltages applied to device input

Заключение. Разработанное устройство позволяет получать высококачественное синусоидальное переменное напряжение заданного уровня из переменного напряжения произвольной формы. При различной форме входного переменного напряжения полученное синусоидальное напряжение на нагрузке имеет искажения не более 3 %.

Литература

1. ***Анисимова Т. В., Данилина А. Н., Крючков В. В.*** Способы повышения качества выходного напряжения инверторов со ступенчатым выходным напряжением // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. № 1. С. 103–112. EDN: MBCMJX.

2. ***Жежеленко И. В.*** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

3. ***Розанов Ю. К.*** Основы силовой преобразовательной техники. М.: Энергия, 1979. 392 с.

4. ***Kaniewski J., Szczesniak P., Jarnut M., Benysek G.*** Hybrid voltage Sag\/Swell compensators: A review of hybrid AC\/AC converters // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2015. Vol. 9. No. 4. P. 37–40. https://doi.org/10.1109/MIE.2015.2404350

5. ***Makky A.-R. A. M., Ahmed N. A., El-Zohri E. H.*** Supply power factor improvement with single-phase AC voltage converter // IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'03). Madison, WI: IEEE, 2003. Vol. 2. P. 863–868. https://doi.org/10.1109/IEMDC.2003.1210336

6. ***Кёниг А., Кёниг М.*** Полное руководство по PIC микроконтроллерам / пер. с нем. В. И. Кириченко, Ю. А. Шпак. Киев: МК-Пресс, 2007. 255 с.

7. ***Мелешин В., Овчинников Д.*** Применение микропроцессоров в системах управления транзисторных выпрямителей // Силовая электроника. 2005. № 6. С. 50–53. EDN: MVRQWV.

8. ***Штерн М. И.*** Силовая электроника. Расчеты и схемотехника. СПб.: Наука и техника, 2017. 398 с.

9. ***Семенов Б. Ю.*** Силовая электроника: профессиональные решения. М.: Солон-Пресс: ДМК-Пресс, 2011. 413 с.

10. ***Катцен С.*** PIC-микроконтроллеры. Все, что вам необходимо знать. М.: Додэка-XXI, 2008. 650 с.

Статья поступила в редакцию 20.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 18.12.2023 г.;
принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Маслаков Максим Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной электроники Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (Россия, 362021, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), kalbash1@mail.ru

Лыков Олег Владимирович – магистрант кафедры промышленной электроники Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (Россия, 362021, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), lykov.oleg89@gmail.com

References

1. Anisimova T. V., Danilina A. N., Kryuchkov V. V. Methods of increasing quality of output voltage for inverters with step output waveform. *Vestnik MAI = Aerospace MAI Journal,* 2010, vol. 17, no. 1, pp. 103–112. (In Russian). EDN: MBCMJX.

2. Zhezhelenko I. V. *Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises.* 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 160 p. (In Russian).

3. Rozanov Yu. K. *Fundamentals of power converter equipment.* Moscow, Energiya Publ., 1979. 392 p. (In Russian).

4. Kaniewski J., Szczesniak P., Jarnut M., Benysek G. Hybrid voltage Sag\/Swell compensators: A review of hybrid AC\/AC converters. *IEEE Industrial Electronics Magazine,* 2015, vol. 9, no. 4, pp. 37–48. https://doi.org/10.1109/MIE.2015.2404350

5. Makky A.-R. A. M., Ahmed N. A., El-Zohri E. H. Supply power factor improvement with single-phase AC voltage converter. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'03).* Madison, WI, IEEE, 2003, vol. 2, pp. 863–868. https://doi.org/10.1109/IEMDC.2003.1210336

6. König A., König M. *Das große PIC-Mikro-Handbuch. Auf CD-ROM: MPLAB, PIC-Programme, Beispielcode.* 2. Aufl. München, FRANZIS, 2007. 336 S. (In German).

7. Meleshin V., Ovchinnikov D. Microprocessors application in control systems of transistor rectifiers. *Silovaya elektronika*, 2005, no. 6, pp. 50–53. (In Russian). EDN: MVRQWV.

8. Shtern M. I. *Power electronics. Calculations and circuit design.* St. Petersburg, Nauka i tekhnika Publ., 2017. 398 p. (In Russian).

9. Semenov B. Yu. *Power electronics: professional solutions.* Moscow, Solon-Press, DMK-Press, 2011. 413 p. (In Russian).

10. Katzen S. *The quintessential PIC microcontroller*. 2nd ed. London, Springer, 2005. 567 p.

The article was submitted 20.11.2023; approved after reviewing 18.12.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Maxim P. Maslakov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Industrial Electronics Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (Russia, 362021, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st., 44), kalbash1@mail.ru

Oleg V. Lykov – Master's degree student of the Industrial Electronics Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (Russia, 362021, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st., 44), lykov.oleg89@gmail.com

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

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.932.4
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-4-539-550
EDN: GUFPVG

Автоматизация определения числа итераций в задаче восстановления смазанных изображений методом Люси – Ричардсона

В. Бордюжа, К. В. Брейкина, С. В. Умняшкин

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

vrinf@miee.ru

Аннотация. Построение автоматизированной системы восстановления смазанных изображений по методу Люси – Ричардсона напрямую связано с определением оптимального количества итераций данного метода для получения наиболее качественного изображения. Эталонные меры качества предпочтительнее использовать в роли критерия остановки итерационного процесса, чем безэталонные меры, ввиду того, что они сильнее коррелируют с качеством изображения, воспринимаемым человеком. Однако на практике автоматизированным системам восстановления доступны только искаженные изображения. В работе предложен подход к определению количества итераций для метода Люси – Ричардсона, основанный на предсказании оптимального числа итераций эталонной меры PieAPP с помощью безэталонной меры CS. Ключевая проблема восстановления – оценка искажающего оператора – решена с помощью нейросетевого алгоритма, построенного на идеях автоэнкодеров и нейросетевой арихектуры Xception. Показано, что использование предложенного подхода позволяет улучшить качество восстановленного изображения для эталонной меры PieAPP относительно сценария восстановления с фиксированным числом итераций. Таким образом, качество автоматизированного (без участия оператора) восстановления искаженных изображений по методу Люси – Ричардсона может быть улучшено.

Ключевые слова: восстановление изображений, компенсация смаза, метод Люси – Ричардсона, автоматизированные системы, нейронные сети

Для цитирования: Бордюжа В., Брейкина К. В., Умняшкин С. В. Автоматизация определения числа итераций в задаче восстановления смазанных изображений методом Люси – Ричардсона // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 4. С. 539–550. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-539-550. – EDN: GUFPVG.

© В. Бордюжа, К. В. Брейкина, С. В. Умняшкин, 2024

Original article

Automation of determining the number of iterations in the problem of blurred images restoration by the Lucy – Richardson method

V. Bordiuzha, K. V. Breykina, S. V. Umnyashkin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

vrinf@miee.ru

Abstract. The implementation of an automated system for restoring blurred images by the Lucy – Richardson method is directly connected with determining the optimal number of iterations of this method to obtain the best quality image. It is preferable to use reference quality measures as a criterion for stopping the iterative process than reference-free measures because they are more strongly correlated with the image quality perceived by a human. However, in practice, only distorted images are available to automated restoration systems. In this work, an approach for determining the number of iterations for the Lucy – Richardson method is proposed based on predicting the optimal number of iterations of the PieAPP reference measure using the CS reference-free measure. The key recovery problem, the estimation of the distorting operator, has been solved using a neural network algorithm based on the ideas of autoencoders and the Xception neural network architecture. It was demonstrated that the use of the proposed approach allows the improvement of the reconstructed image quality for the PieAPP reference measure compared with a reconstruction scenario with a fixed number of iterations. Thus, the quality of automated (with no operator participation) reconstruction of distorted images by the Lucy – Richardson method can be improved.

Keywords: image restoration, blur compensation, Lucy – Richardson method, automated systems, neural networks

For citation: Bordiuzha V., Breykina K. V., Umnyashkin S. V. Automation of determining the number of iterations in the problem of blurred images restoration by the Lucy – Richardson method. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 539–550. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-539-550. – EDN: GUFPVG.

Введение. Основная проблема применения классических итерационных методов восстановления изображений, искаженных линейной пространственно-инвариантной системой [1], – сложность определения момента остановки итерационного процесса. Вопрос выбора оптимального номера итерации усложняется тем, что в процессе восстановления оригинальное (неискаженное) изображение недоступно. Следовательно, оценка качества восстановления, как и определение момента остановки итерационного процесса, может происходить лишь на основе каких-то косвенных измерений.

В настоящей работе предлагается подход определения количества итераций для метода Люси – Ричардсона, основанный на предсказании оптимального числа итераций эталонной меры PieAPP с помощью безэталонной меры CS. Оценка параметров искажающего оператора проводится нейронной сетью на базе архитектуры Xception.

Постановка задачи. Сформулируем математическую постановку задачи компенсации искажений для цифровых изображений. Пусть $f(x,y)$ – неискаженное монохромное изображение; $g(x,y)$ – монохромное искаженное изображение; $h(x,y)$ – импульсная характеристика оператора искажения; $\eta(x,y)$ – некоррелированный с изображением белый шум. Полагаем $x \in \breve{y}$, $y \in \breve{y}$. Двумерная импульсная характеристика $h(x,y)$, или функция рассеяния точки, представляет собой реакцию двумерной дискретной системы на единичный импульс [1, 2]:

$$\delta(n,m) = \begin{cases} 1, & n = m = 0, \\ 0, & n \neq 0 \text{ или } m \neq 0. \end{cases}$$

Фурье-образы функций $f(x,y), g(x,y), h(x,y), \eta(x,y)$, полученных с помощью дискретного преобразования Фурье [1, 2], обозначим соответственно $F(u,v)$, $G(u,v)$, $H(u,v)$, $N(u,v)$.

Рассмотрим линейную модель искажений [1] (рис. 1):

$$g(x,y) = h(x,y) \otimes f(x,y) + \eta(x,y), \tag{1}$$

где $\otimes$ – операция двумерной свертки изображения $f(x,y)$ с импульсной характеристикой искажающей системы $h(x,y)$ размером $(2a+1)\times(2b+1)$, которая описывается выражением [1]

$$h(x,y) \otimes f(x,y) = \sum_{s=-a}^{a} \sum_{t=-b}^{b} h(s,t) f(x-s, y-t).$$

Процесс искажения моделируется как результат фильтрации исходного изображения согласно схеме, представленной на рис. 1. Импульсная характеристика $h(x,y)$ считается неизвестной. Ввиду воздействия внешних факторов к искажениям также добавляется белый шум $\eta(x,y)$, который считается некоррелированным с изображением.

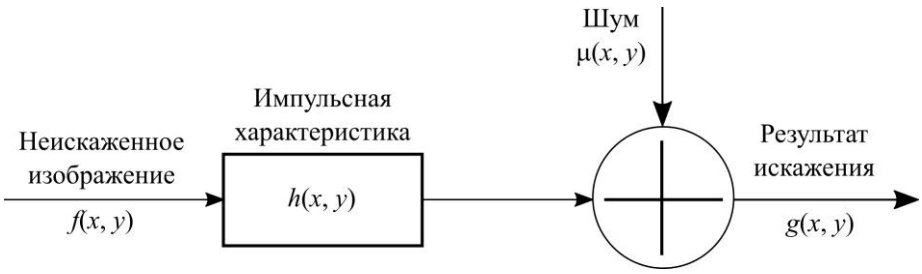


Рис. 1. Линейная модель искажения изображения
Fig. 1. Linear model of image distortion

Умножение в частной области и свертка в пространственной области эквивалентны, поэтому процесс искажения в частотной области (1) имеет вид [2]

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) + N(u,v).$$

Основная причина возникновения смаза изображения – движение камеры относительно сцены, а вид импульсной характеристики зависит от направления и скорости движения. В простейшем случае камера движется линейно с постоянной относительно

сцены скоростью. Тогда импульсная характеристика при равномерном прямолинейном движении по направлению оси координат *y* следующая [3]:

$$h(x,y)=\begin{cases}\dfrac{1}{L+1}, 0\le y\le L, x=0,\\ 0 \text{ в остальных случаях},\end{cases} \tag{2}$$

где L – величина смаза в пикселях.

Выражение (2) является одним из вариантов функции рассеяния точки. Смаз может моделироваться не только линейным отрезком, но и более сложной кривой, например второго или третьего порядка.

Задача восстановления изображения заключается в получении оценки $\hat{f}(x,y)$ оригинального изображения $f(x,y)$ из (1). На основании результатов предыдущих исследований [4] принято решение восстанавливать смазанные изображения по методу Люси – Ричардсона [5]. Приведем формулу для оценки неискаженного изображения $\hat{f}_k(x,y)$ на *k*-й итерации в методе Люси – Ричардсона [5]:

$$\hat{f}_k(x,y)=\hat{f}_{k-1}(x,y)\left(h(-x,-y)\otimes\frac{g(x,y)}{h(x,y)\otimes\hat{f}_{k-1}(x,y)}\right), \tag{3}$$

где $\hat{f}_{k-1}(x,y)$ – оценка неискаженного изображения на (k–1)-й итерации алгоритма Люси – Ричардсона; $g(x,y)$ – искаженное изображение; $h(x,y)$ – импульсная характеристика искажающей системы.

Один из недостатков рассматриваемого метода – его чувствительность к ошибкам при оценке искажающего оператора $h(x,y)$, поэтому важно определить искажающий оператор как можно точнее. Помимо этого, в процессе восстановления изображение может начать деградировать, т. е. до определенного момента метод Люси – Ричардсона улучшает качество изображения, а затем с увеличением номера итерации качество изображения ухудшается. Предлагается оценивать искажающий оператор с помощью алгоритма [4], после чего выполнять итерационное восстановление изображения (3).

Восстановление изображений. Рассмотрим алгоритм оценки искажающего оператора для дальнейшего использования в методе Люси – Ричардсона. Предлагаемый подход основан на использовании идеи автоэнкодера [6] и нейросетевой архитектуры Xception [7] (рис. 2).

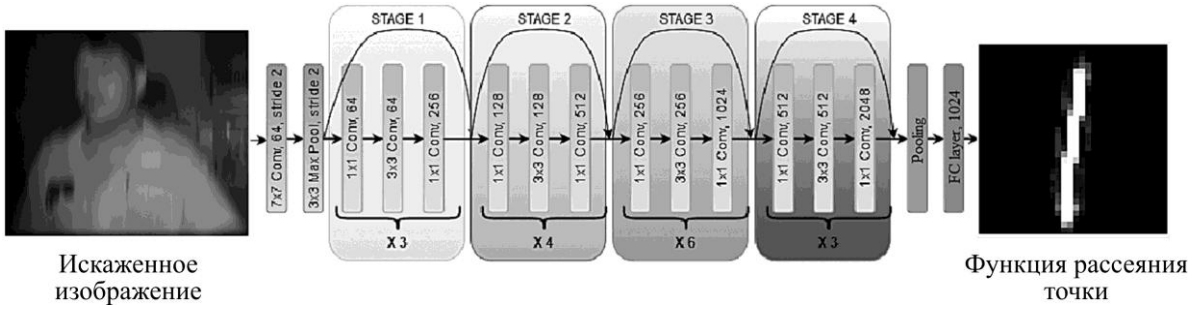


Рис. 2. Архитектура нейронной сети для оценки импульсной характеристики
Fig. 2. Neural network architecture for impulse response estimation

В исходной архитектуре Xception модернизировали слой субдискретизации (пулинга), а также выходной слой нейронной сети в соответствии с задачей оценки искажающего оператора. В работе [7] в качестве слоя субдискретизации выступает усреднение, а функция ошибки – перекрестная энтропия, однако исходная задача в [7] состояла в классификации.

В ходе исследований рассмотрены различные функции потерь для улучшения аппроксимации искажающего оператора: MSE, MAE [8] и кросс-энтропия. Проверяли также возможность замены усреднения в слое субдискретизации на максимум. По результатам тестирования наилучший результат показало использование максимального пулинга в сочетании с функцией потерь в виде кросс-энтропии [4]. Оценка импульсной характеристики искажающей системы, полученная обученной нейронной сетью Xception, далее используется в методе Люси – Ричардсона (3) [4].

Показатели качества изображений. Для корректного восстановления изображения и рационального использования вычислительных ресурсов необходимо задать требуемое число итераций алгоритма Люси – Ричардсона. Для этого проводится оценка качества восстановления изображения. Рассмотрим такие показатели качества изображений, как эталонные меры качества, использующие для вычислений информацию об оригинальном (неискаженном) изображении: PSNR [9], SSIM [10] и PieAPP[11]; безэталонные меры качества: BRISQUE [12], NIQE [13].

Мера PSNR количественно характеризует близость восстановленного изображения к неискаженному оригиналу. Величина SSIM может принимать значения от –1 до 1: чем ближе значение этой меры к единице, тем ближе восстановленное изображение к оригинальному (неискаженному).

Мера PieAPP позволяет оценить качество изображений. Вместо того чтобы использовать данные с оценками качества, сделанными с помощью экспертов, в работе [11] предложен подход на основе попарного обучения ошибкам восприятия изображений. Для реализации этой стратегии подготовлен отдельный набор данных, состоящий из 200 качественных изображений и 75 видов искажений. Оценка качества изображения проходит в два этапа. На первом этапе из эталонного и искаженного изображений извлекают признаки с помощью нейросетевой модели, состоящей из 11 сверточных слоев. Для этого оба изображения делят на 36 частей (в общем случае перекрывающихся) размером 64 × 64 пикселя и проводят извлечение признаков. Признаки, извлеченные из соответствующих частей, попарно подают на вход другой нейросетевой модели, которая, в свою очередь, уже предсказывает меру качества. Итоговое значение качества изображения представляет собой взвешенную сумму оценок всех 36 частей.

Мера BRISQUE извлекает точечную статистику локальных нормализованных сигналов яркости и измеряет «естественность» изображения. Для оценки качества используется метод опорных векторов для задачи регрессии [14]. В наборе данных для обучения должны присутствовать как искаженные, так и неискаженный экземпляры изображений, также необходима информация о типе искажения. В [12] обучающий набор данных содержит примеры с артефактами сжатия, размытия, шума, а также исходные версии неискаженных изображений.

NIQE – безэталонный анализатор качества изображения. От других подходов его отличает процесс обучения, в котором не принимают участия искаженные изображения или экспертные оценки. Оценка качества основывается на вычислении отклонений от статических признаков естественных изображений. Данный метод проще (BRISQUE, TMIQ [12]), а мера обеспечивает показатели на уровне наиболее эффективных моделей без эталона, требующих обучения на данных с экспертными оценками качества.

Известно [4], что чем меньше значения мер BRISQUE и NIQE, тем лучше качество восстановления. Недостатком этих мер является то, что для их вычисления требуются значительные вычислительные затраты.

Безэталонная мера CS. Для того чтобы определить количество итераций, достаточное для восстановления искаженного изображения, используется мера CS (Correlation Speed) [15]. Эта мера построена на основе анализа межстрочной и межстолбцовой корреляций пикселей изображения, а именно на скорости и характере ее изменения. Неискаженные или качественно восстановленные изображения отличаются от размытых тем, что на них больше границ и деталей, а значит имеются области, в которых пиксели пространственно менее коррелированы.

Введем понятия межстрочной и межстолбцовой корреляций, которые будут характеризовать сходство пикселей между строками и столбцами изображения соответственно. Под коэффициентом межстрочной корреляции $c_{row}(f)$ будем понимать выборочное значение коэффициента корреляции соседних пикселей в столбце изображения *f*. Соответственно, коэффициент межстолбцовой корреляции $c_{col}(f)$ – выборочное значение коэффициента корреляции соседних пикселей в строке изображения *f*.

Определим скорость изменения межстрочной корреляции:

$$R_{row}(\hat{f}_k) = \left| c_{row}(\hat{f}_k) - c_{row}(\hat{f}_{k-1}) \right|, \tag{4}$$

где $c_{row}(\hat{f}_k)$, $c_{row}(\hat{f}_{k-1})$ – соответственно коэффициенты межстрочной корреляции изображений $\hat{f}_k$ и $\hat{f}_{k-1}$, построенных с применением формулы (3).

Скорость изменения межстолбцовой корреляции определяется аналогично (4):

$$R_{col}(\hat{f}_k) = \left| c_{col}(\hat{f}_k) - c_{col}(\hat{f}_{k-1}) \right|.$$

При выборе корректного оператора искажения метод Люси – Ричардсона постепенно улучшает изображение. Предполагается, что скорость изменения межстрочных и межстолбцовых коэффициентов корреляции должна уменьшаться и по достижении требуемого количества итераций стать минимальной [15].

Рассмотрим модуль разности между скоростями изменения межстрочных и межстолбцовых коэффициентов корреляции на *k*-й итерации метода Люси – Ричардсона:

$$CS(\hat{f}_k) = \left| R_{row}(\hat{f}_k) - R_{col}(\hat{f}_k) \right|, \tag{5}$$

где $R_{row}(\hat{f}_k)$, $R_{col}(\hat{f}_k)$ – скорость изменения межстрочной и межстолбцовой корреляции изображения $\hat{f}_k$ (3) соответственно.

Числовая характеристика (5) названа мерой CS [15]. Скорости изменения коэффициентов корреляции по строкам и столбцам имеют близкие значения в случае выбора правильных параметров. Следовательно, с помощью величины (5) можно отследить момент, когда итерационный процесс восстановления входит в «установившийся» режим, т. е. значение (5) становится малым и практически не изменяется от итерации к итерации. Тогда дальнейшие итерации метода Люси – Ричардсона становятся ненужными и, возможно, могут привести к постепенной деградации изображения.

Оценка количества итераций. Безэталонная мера CS хорошо себя показывает при восстановлении фотографических изображений, когда оператор смаза аппроксимируется кривой 2-го или 3-го порядка. Среди рассмотренных мер качества следует выделить меру PieAPP: она лучше всего согласуется с экспертной оценкой качества, но она явля-

ется эталонной, значит, ее невозможно напрямую использовать в качестве критерия остановки итерационного процесса в методе Люси – Ричардсона. Эталонные меры всегда предпочтительнее безэталонных: как правило, их проще вычислить, они сильнее коррелируют с качеством изображения, воспринимаемым человеком. Однако на практике встречаются уже искаженные изображения, поэтому можно применять только безэталонные меры качества.

Воспользуемся безэталонной мерой CS для аппроксимации эталонной меры PieAPP и поставим следующую задачу: по значениям меры CS, вычисленной на каждой из 100 итераций метода Люси – Ричардсона, надо предсказать номер итерации, на котором мера PieAPP достигает своего наименьшего значения. Для экспериментов создан набор из 5000 искусственно смазанных монохромных изображений. Импульсную характеристику оператора искажения $h(x, y)$ моделировали с помощью открытой программной реализации, имплементирующей алгоритм из работы [16]. Размер матрицы искажающего оператора составлял 32×32 точки. Примеры импульсной характеристики искажающего оператора представлены на рис. 3.



Рис. 3. Примеры импульсной характеристики (функции рассеяния точки) искажающего оператора
Fig. 3. Examples of pulse response (point spread function) of a distorting operator

Для решения поставленной задачи аппроксимации применим метод опорных векторов для регрессии (SVR) [14]. В качестве вектора признаков выступают значения меры CS, вычисленные на каждой из 100 итераций алгоритма Люси – Ричардсона, и разность между соседними отсчетами CS для этих же 100 итераций. Искомое значение распознавателя – номер итерации, на котором мера PieAPP достигает своего минимального значения. Реализация метода опорных векторов взята из библиотеки машинного обучения Scikit-learn [17]. SVR обучена с радиальными ядрами и параметром gamma = 0,0025. В качестве функции штрафа выбрана MSE для номера итерации. Такую функцию ошибок целесообразно использовать, поскольку график функции условно симметричен относительно точки минимума меры PieAPP (рис. 4).

Для обучения и тестирования SVR сформирован набор из 5000 примеров, разделенный на две подвыборки: обучающую (80 %) и тестовую (20 %). Оценку качества обученной модели проводили с помощью функций потерь MAE и RMSE. Предсказанное количество итераций сравнивали с оптимальным значением, соответствующим минимуму меры PieAPP. Результаты SVR на обучающем и тестовом датасетах приведены в табл. 1. Среднее число итераций, предсказанное алгоритмом SVR, – 15.



Рис. 4. Зависимость меры PieAPP от номера итерации
Fig. 4. The plot of dependence of the PieAPP measure on number of iterations

Таблица 1

Результаты работы SVR на обучающем и тестовом наборах данных

Table 1

SVR results on the training and test dataset

Набор данных	RMSE	MAE
Обучающий	8,7	6,7
Тестовый	8,8	6,9

Рассмотрим пример восстановления изображения с использованием данного алгоритма, а также сравним качество восстановления относительно стратегии с фиксированным числом итераций (10, 30, 100). Исходное изображение (рис. 5, *а*) искажено оператором импульсной характеристики (рис. 5, *б*), в результате получилось искаженное изображение (рис. 5, *в*). Оценка импульсной характеристики, полученная с помощью нейросетевого алгоритма на основе архитектуры Xception, приведена на рис. 5, *г*. Так как областью интереса на изображении является человеческое лицо, то оценка качества изображения для всех мер будет проводиться по области лица (рис. 6), расширенной на 20 пикселей в каждую из сторон. Результаты восстановления изображений для различных стратегий компенсации искажений приведены в табл. 2.

Согласно табл. 2 качество изображения по мерам PSNR и PieAPP становится лучше по сравнению с изображениями, восстановленными при фиксированном количестве итераций (10, 30, 100). Высокие показатели по мере PSNR позволяют сделать вывод о том, что качество изображения удалось в значительной степени улучшить. Это согласуется со значением меры качества PieAPP: на 15 итерациях она достигает своего наименьшего значения (см. табл. 2). Для мер BRISQUE, SSIM и NIQE восстановление при 15 итерациях позволяет достичь второго по величине значения.

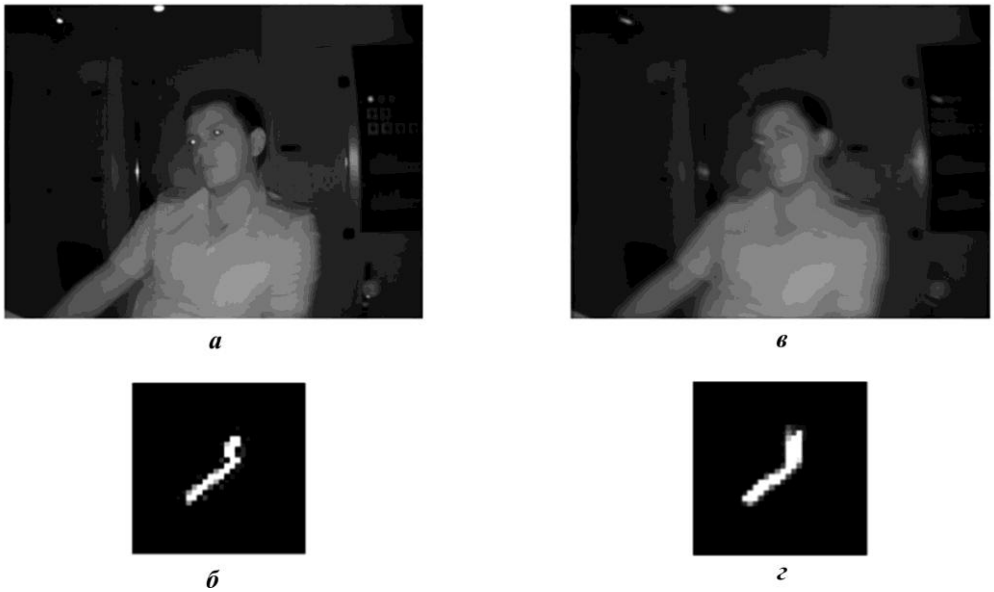


Рис. 5. Процесс восстановления: *а* – исходное изображение; *б* – искажающий оператор; *в* – искаженное изображение; г – оценка искажающего оператора

Fig. 5. Reconstruction process: *a* – original image; *b* – distorting operator; *c* – distorted image; *d* – evaluation of the distorting operator



а *б* *в* *г*

Рис. 6. Область интересов, восстановленная при разном количестве итераций: *а* – 10 итераций; *б* – 15 итераций (оценка получена через SVR); *в* – 30 итераций; *г* – 100 итераций
Fig. 6. Area of interest recovered at different number of iterations: *a* – 10 iterations; *b* – 15 iterations (estimate obtained by SVR); *c* – 30 iterations; *d* – 100 iterations

Таблица 2

Значения метрик качества для восстановленных изображений

Table 2

Values of quality metrics for the reconstructed images

Количество итераций	PSNR ↑	SSIM ↑	PieAPP ↓	BRISQUE ↓	NIQE ↓
Искаженное изображение	31,7	0,92	1,22	44,35	19,34
10 итераций	*34,87*	**0,94**	*0,60*	35,06	12,31
15 итераций (SVR)	**35,96**	*0,94*	**0,52**	*31,55*	*9,89*
30 итераций	34,5	0,92	0,71	**26,14**	**7,87**
100 итераций	27,15	0,49	1,13	50,73	17,94

Примечание: ↑ – метрики качества, для которых большее значение меры означает более хорошее качество, ↓ – метрики качества, для которых меньшее значение меры означает более хорошее качество; жирным шрифтом выделены лучшие значения в столбце, курсивом – вторые по величине.

Результаты и их обсуждение. Для сравнения качества работы методов проведем ряд экспериментов на тестовом наборе из 5000 полутоновых фотографий машинистов с разрешением 640 × 480 пикселей. Эти изображения получены с устройств компании «КСОР» (г. Москва), установленных в головных вагонах Московского метрополитена. Оператор смаза для каждого случая моделируется случайным образом: интенсивность – случайная величина из равномерного распределения на отрезке [0; 1], размер матрицы искажающего оператора 32 × 32. Оценим искажающий оператор с помощью нейронной сети, основанной на архитектуре Xception, и восстановим изображение с помощью метода Люси – Ричардсона. Рассмотрим четыре случая восстановления: 10, 30 и 100 шагов алгоритма Люси – Ричардсона (количество итераций фиксировано), количество итераций вычисляется с помощью SVR. Результаты восстановления для набора данных из 5000 изображений приведены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, при использовании оптимального числа итераций удается улучшить показатели меры PieAPP. Это соответствует тому, что в процессе восстановления получено более качественное изображение. Преимуществом наличия критерия остановки итерационного алгоритма является сокращение вычислительных затрат: при небольших искажениях фиксированное число итераций может оказаться избыточным.

Таблица 3

Среднее значение мер качества для различных случаев восстановления изображения методом Люси – Ричардсона

Table 3

Mean value of quality measures for different recovery cases of image restoration by the Lucy – Richardson method

Количество итераций	PSNR ↑	SSIM ↑	PieAPP ↓	BRISQUE ↓	NIQE ↓
Искаженное изображение	32,28	*0,91*	0,99	63,13	15,27
10 итераций	**32,91**	**0,91**	*0,53*	44,60	11,89
30 итераций	31,22	0,83	0,58	**17,09**	**8,98**
100 итераций	26,16	0,48	1,63	41,54	14,15
Количество итераций вычисляется с помощью SVR	*32,76*	0,90	**0,37**	*35,51*	*10,36*

Примечание: ↑ – метрики качества, для которых большее значение меры означает более хорошее качество, ↓ – метрики качества, для которых меньшее значение меры означает более хорошее качество; жирным шрифтом выделены лучшие значения в столбце, курсивом – вторые по величине.

Заключение. Использование предложенного подхода к определению количества итераций для метода Люси – Ричардсона, основанного на предсказании оптимального числа итераций эталонной меры PieAPP с помощью безэталонной меры CS, позволяет улучшить качество восстановленного изображения для эталонной меры PieAPP относительно сценария восстановления с фиксированным числом итераций. В результате качество автоматизированного (без участия оператора) восстановления искаженных изображений по методу Люси – Ричардсона улучшается.

Литература

1. ***Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е.*** Цифровая обработка изображений. 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

2. ***Умняшкин С. В.*** Основы теории цифровой обработки сигналов: учеб. пособие. 6-е изд., испр. М.: Техносфера, 2021. 550 с. EDN: XJXXWU.

3. ***Biemond J., Lagendijk R. L., Mersereau R. M.*** Iterative methods for image deblurring // Proceedings of the IEEE. 1990. Vol. 78. No. 5. P. 856–883. https://doi.org/10.1109/5.53403

4. ***Бордюжа В., Умняшкин С. В.*** Предобработка изображений для повышения качества распознавания лиц на цифровых фото // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2023): доклады XXV Междунар. конф. (Москва, 29–31 мар. 2023). М.: Рос. НТО радиотехники, электрон. и связи им. А. С. Попова, 2023. С. 299–304. EDN: BSVLHJ.

5. ***Lucy L. B.*** An iterative technique for the rectification of observed distributions // Astron. J. 1974. Vol. 79. No. 6. P. 745–754. https://doi.org/10.1086/111605

6. ***Bank D., Koenigstein N., Giryes R.*** Autoencoders // Machine Learning for Data Science Handbook / eds L. Rokach et al. Cham: Springer International, 2023. P. 353–374. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24628-9_16

7. ***Chollet F.*** Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions // ArXiv [Электронный ресурс]. 07.10.2016. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.02357 (дата обращения: 20.05.2024).

8. Statistics for the evaluation and comparison of models / ***C. J. Willmott, S. G. Ackleson, R. E. Davis et al.*** // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90. Iss. C5. P. 8995–9005. https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995

9. ***Eskicioglu A. M., Fisher P. S.*** Image quality measures and their performance // IEEE Transactions on Communications. 1995. Vol. 43. No. 12. P. 2959–2965. https://doi.org/10.1109/26.477498

10. ***Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P.*** Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13. No. 4. P. 600–612. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861

11. ***Prashnani E., Cai H., Mostofi Y., Sen P.*** PieAPP: Perceptual image-error assessment through pairwise preference // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Salt Lake City, UT: IEEE, 2018. P. 1808–1817. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00194

12. ***Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C.*** No-reference image quality assessment in the spatial domain // IEEE Transactions on Image Processing. 2012. Vol. 21. No. 12. P. 4695–4708. https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2214050

13. ***Mittal A., Soundararajan R., Bovik A. C.*** Making a “completely blind” image quality analyzer // IEEE Signal Processing Letters. 2013. Vol. 20. No. 3. P. 209–212. https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2227726

14. ***Smola A. J., Schölkopf B.*** A tutorial on support vector regression // Statistics and Computing. 2004. Vol. 14. Iss. 3. P. 199–222. https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88

15. ***Брейкина К. В., Умняшкин С. В.*** Оценка качества изображения при компенсации смаза по методу Люси – Ричардсона // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 2. С. 167–174. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-2-167-174

16. ***Mei C., Reid I.*** Modeling and generating complex motion blur for real-time tracking // 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK: IEEE, 2008. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587535

17. Scikit-learn: Machine learning in Python // Scikit-Learn [Электронный ресурс]. URL: https://scikit-learn.org/stable (дата обращения: 20.05.2024).

Статья поступила в редакцию 18.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.11.2023 г.; принята к публикации 14.06.2024 г.

Информация об авторах

Бордюжа Виктор – аспирант кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), victor30608@yandex.ru

Брейкина Кристина Владимировна – ассистент кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), panfilova_krista@mail.ru

Умняшкин Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vrinf@miee.ru

References

1. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2007. 976 p.

2. Umnyashkin S. V. *Fundamentals of the theory of digital signal processing*, study guide. 6th ed., rev. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2021. 550 p. (in Russian). EDN: XJXXWU.

3. Biemond J., Lagendijk R. L., Mersereau R. M. Iterative methods for image deblurring. *Proceedings of the IEEE*, 1990, vol. 78, no. 5, pp. 856–883. https://doi.org/10.1109/5.53403

4. Bordiuzha V., Umnyashkin S. V. Image preprocessing to improve facial recognition in digital photos. *Tsifrovaya obrabotka signalov i eye primeneniye (DSPA-2023)*, proceedings of 25th International conf. (Moscow, March 29–31, 2023). Moscow, Ros. NTO radiotekhniki, elektron. i svyazi im. A. S. Popova Publ., 2023, pp. 299–304. (In Russian). EDN: BSVLHJ.

5. Lucy L. B. An iterative technique for the rectification of observed distributions. *Astron. J.*, 1974, vol. 79, no. 6, pp. 745–754. https://doi.org/10.1086/111605

6. Bank D., Koenigstein N., Giryes R. Autoencoders. *Machine Learning for Data Science Handbook*, eds L. Rokach et al. Cham, Springer International, 2023, pp. 353–374. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24628-9_16

7. Chollet F. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. *ArXiv*. 07.10.2016. Available at: https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.02357 (accessed: 20.05.2024).

8. Willmott C. J., Ackleson S. G., Davis R. E., Feddema J. J., Klink K. M., Legates D. R., O'Donnell J., Rowe C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.*, 1985, vol. 90, iss. C5, pp. 8995–9005. https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995

9. Eskicioglu A. M., Fisher P. S. Image quality measures and their performance. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, vol. 43, no. 12, pp. 2959–2965. https://doi.org/10.1109/26.477498

10. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600–612. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861

11. Prashnani E., Cai H., Mostofi Y., Sen P. PieAPP: Perceptual image-error assessment through pairwise preference. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* Salt Lake City, UT, IEEE, 2018, pp. 1808–1817. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00194

12. Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C. No-reference image quality assessment in the spatial domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, vol. 21, no. 12, pp. 4695–4708. https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2214050

13. Mittal A., Soundararajan R., Bovik A. C. Making a "completely blind" image quality analyzer. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 209–212. https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2227726

14. Smola A. J., Schölkopf B. A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 2004, vol. 14, iss. 3, pp. 199–222. https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88

15. Breykina K. V., Umnyashkin S. V. Image quality estimation for blur compensation using Lucy – Richardson method. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 167–174. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-2-167-174

16. Mei C., Reid I. Modeling and generating complex motion blur for real-time tracking. *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* Anchorage, AK, IEEE, 2008, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587535

17. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Scikit-Learn*. Available at: https://scikit-learn.org/stable (accessed: 20.05.2024).

The article was submitted 18.10.2023; approved after reviewing 29.11.2023;
accepted for publication 14.06.2024.

Information about the authors

Viktor Bordiuzha – PhD student of the High Mathematics-1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), victor30608@yandex.ru

Kristina V. Breykina – Assistant of the High Mathematics-1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), panfilova_krista@mail.ru

Sergey V. Umnyashkin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the High Mathematics-1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vrinf@miee.ru

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

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