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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 29
№ 6
ноябрь – декабрь

Vol. 29
No. 6
November – December

2024

ПОДПИСКА 2025

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

Периодичность журнала – 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 29, № 6, 2024
ноябрь – декабрь

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

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Громов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4563-9831
Душкин Александр Викторович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Коноплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Мещеряков Роман Валерьевич – д.т.н., проф., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1129-8434
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., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (г. Долгопрудный, Россия), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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

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

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

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

Подписано в печать 05.12.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 18,135 усл.печ.л., 15,552 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 16. 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

Верюжский И. В., Приходько А. С., Усков Ф. А., Григорашвили Ю. Е., Боргардт Н. И. Импульсное лазерное осаждение монокристаллических пленок сплава Гейслера CoFeMnSi на подложке MgO 703

Материалы электроники

Тарасов Д. В., Соколов Е. М., Гаврилов С. А. Исследование процесса многослойного роста поликристаллических кремниевых слоев для управления деформацией кремниевых структур в технологии химического газового транспорта 715

Технологические процессы и маршруты

Грудцов В. П., Еганова Е. М., Губанова О. В., Горячев А. В., Пучнин К. В., Рязанцев Д. В., Кузнецов А. Е., Комарова Н. В. Атомно-слоевое осаждение оксида тантала для сенсоров на основе полевого эффекта 724

Лавров И. В., Дронова Д. А., Силибин М. В., Аникин А. В., Дубков С. В., Лебедев Е. А., Шарипов Р. А., Вигдорович Е. Н., Громов Д. Г. Моделирование дифракционных эффектов при использовании фазосдвигающих слоев в фотолитографии 736

Элементы интегральной электроники

Ходаков А. М., Сергеев В. А., Фролов И. В., Радаев О. А., Зайцев С. А. Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в светодиодных матрицах 752

Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Егоркин В. И., Котляров Е. Ю., Лосев В. В., Чаплыгин Ю. А. Исследование зависимостей входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора от режимов работы в гигагерцовом диапазоне 763

Максименко Ю. Н., Петросянц К. О., Силкин Д. С., Грабежова В. К. Высокочастотная модель транзистора со статической индукцией 772

Схемотехника и проектирование

Матешева В. В., Попов В. Д. Изменение характеристик аналогового выходного каскада при воздействии низкоинтенсивного излучения 787

Малинаускас К. К. Алгоритм динамического программирования для оптимизации дерева буферизации по числу буферов и инверторов 792

Интегральные радиоэлектронные устройства

Бабушкин Е. А., Калашников Р. В., Лаврентьев А. М., Зайцев С. А., Смолев И. А. Методика оценки количества источников излучения в условиях амплитудно-фазовой неидентичности 805

Биомедицинская электроника

Аубакиров Р. Р., Данилов А. А. Использование эффекта сильной связи для уменьшения размера принимающей катушки без понижения устойчивости системы индуктивной передачи энергии к имплантатам 819

Информационно-коммуникационные технологии

Новиков Ю. И., Лупин С. А., Савченко Ю. В., Звонарев Д. А. Параллельная реализация алгоритма повышения контрастности изображения на основе нечетких множеств 832

Юбилеи

Гаврилову Сергею Витальевичу – 65 лет 845

Тематический указатель статей, опубликованных в 2024 году 846

К сведению авторов 851

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 29, No. 6, 2024
November – December

The scientifical and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

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

© "Proceedings of Universities. Electronics", 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., Moscow Institute of Physics and Technology (Dolgoprudny, Russia), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vyacheslav V. Svetukhin – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMC "Technological Centre" (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Head of editorial staff ***Doronina I. M.***
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 05.12.2024. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 18,135. Number of copies 150. Order no. 16. 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

Veryuzhskii I. V., Prikhodko A. S., Uskov F. A., Grigorashvili Yu. E., Borgardt N. I. Single-Crystalline CoFeMnSi Heusler alloy thin films as prepared by pulsed laser deposition on MgO substrate 703

Electronics materials

Tarasov D. V., Sokolov E. M., Gavrilov S. A. Research of multilayer growth process of polycrystalline silicon layers for silicon structures deformation control in chemical gas transport technology 715

Technological processes and routes

Grudtsov V. P., Eganova E. M., Gubanova O. V., Goryachev A. V., Puchnin K. V., Ryazantsev D. V., Kuznetsov A. E., Komarova N. V. Atomic layer deposition of tantalum oxide for field effect sensors 724

Lavrov I. V., Dronova D. A., Silibin M. V., Anikin A. V., Dubkov S. V., Lebedev E. A., Sharipov R. A., Vigdorovich E. N., Gromov D. G. Simulation of the diffraction effects using phase-shifting layers in photolithography 736

Integrated electronics elements

Khodakov A. M., Sergeev V. A., Frolov I. V., Radaev O. A., Zaitsev S. A. Simulation and research of thermoelectric processes in LED matrixes 752

Khlybov A. I., Rodionov D. V., Egorkin V. I., Kotlyarov E. Yu., Losev V. V., Chaplygin Yu. A. Research of dependences of the normally-off GaN HEMT input parameters on the operating conditions at the GHz band 763

Maksimenko Yu. N., Petrosyants K. O., Silkin D. S., Grabezhova V. K. High-frequency transistor model with static induction 772

Circuit engineering and design

Matesheva V. V., Popov V. D. Changes in the characteristics of the analog output stage when exposed to low-intensity radiation 787

Malinauskas K. K. A dynamic programming algorithm for the buffering tree optimization by the number of buffers and inverters 792

Integrated radioelectronic devices

Babushkin E. A., Kalashnikov R. V., Lavrentyev A. M., Zaitsev S. A., Smolev I. A. Methodology for assessing the number of radiation sources under conditions of amplitude-phase non-identity 805

Biomedical electronics

Aubakirov R. R., Danilov A. A. Using the strong coupling effect to reduce the size of the receiving coil without reducing the stability of the inductive energy transfer system to implants 819

Information-communication technologies

Novikov Yu. I., Lupin S. A., Savchenko Yu. V., Zvonarev D. A. Parallel implementation of the image contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets 832

Anniversaries

Gavrilov Sergey Vitalievich is 65 years old 845

Thematic index of articles published in 2024 846

Instructions for authors 851

Научная статья
УДК 620.3:548.5
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-703-714
EDN: GTIDDT

Импульсное лазерное осаждение монокристаллических пленок сплава Гейслера CoFeMnSi на подложке MgO

И. В. Верюжский, А. С. Приходько, Ф. А. Усков, Ю. Е. Григорашвили, Н. И. Боргардт

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

vervan2005@mail.ru

Аннотация. Для создания современных устройств спинтроники представляют интерес гетероструктуры на основе спинового бесщелевого полупроводника CoFeMnSi. Характеристики таких устройств определяются структурными и магнитными свойствами слоя CoFeMnSi. В настоящее время актуальной задачей является разработка технологии изготовления бездефектных тонкопленочных слоев CoFeMnSi. В работе рассмотрены тонкие монокристаллические пленки CoFeMnSi, выращенные на поверхности подложки MgO(100) методом импульсного лазерного осаждения. Проведена оптимизация технологических параметров изготовления пленок CoFeMnSi. Показано, что путем выбора оптимальных значений температуры подложки MgO(100), расстояния мишень – подложка, энергии и частоты генерации импульсного лазерного излучения могут быть изготовлены пленки CoFeMnSi в островковом или послойно-островковом режимах роста. Установлено, что для выращивания пленок CoFeMnSi в послойном режиме необходимо введение двухминутных пауз при формировании каждого нового слоя пленки, применение которых позволило вырастить атомарно гладкие монокристаллические пленки CoFeMnSi толщиной до 20 нм. Электронно-микроскопические исследования и дифракционный анализ образцов поперечного сечения выращенных на подложке пленок продемонстрировали, что они имеют совершенную кубическую кристаллическую структуру. Положение рефлексов на дифракционной картине указывает на то, что кубические элементарные ячейки пленки CoFeMnSi (пространственная группа $F\bar{4}3m$) и кристалла MgO(100) повернуты относительно друг друга на угол 45° вокруг направления MgO[001], при этом обеспечивается их согласование по плоскостям CoFeMnSi(202) и MgO(020). Полученные результаты работы могут быть использованы для изготовления многослойных гетероструктур и приборов на их основе.

© И. В. Верюжский, А. С. Приходько, Ф. А. Усков, Ю. Е. Григорашвили, Н. И. Боргардт, 2024

Ключевые слова: бесщелевой полупроводник, спинтроника, тонкие пленки, лазерное осаждение, эпитаксия, монокристалл, сплав CoFeMnSi

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

Для цитирования: Импульсное лазерное осаждение монокристаллических пленок сплава Гейслера CoFeMnSi на подложке MgO / И. В. Верюжский, А. С. Приходько, Ф. А. Усков и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 703–714. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-703-714. – EDN: GTIDDT.

Original article

Single-Crystalline CoFeMnSi Heusler alloy thin films as prepared by pulsed laser deposition on MgO substrate

I. V. Veryuzhskii, A. S. Prikhodko, F. A. Uskov, Yu. E. Grigorashvili, N. I. Borgardt

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

vervan2005@mail.ru

Abstract. Heterostructures based on spin-gapless semiconductor CoFeMnSi are of significant interest for developing modern spintronic devices. The characteristics of such devices are determined by the structural and magnetic properties of the CoFeMnSi layer. The development of technology for manufacturing defect-free thin film layers of CoFeMnSi is currently relevant. In this work, the thin single-crystal CoFeMnSi films grown by pulsed laser deposition on the surface of the MgO(100) substrate are considered. The technological parameters for the production of CoFeMnSi films are optimized. It was shown that by selecting the optimal values of the MgO(100) substrate temperature, the target – substrate distance, the energy and frequency of pulsed laser radiation, CoFeMnSi films can be produced in island or layer-by-island growth modes. It has been established that for growing CoFeMnSi films in a layer-by-layer mode, it is necessary to introduce 2-minute pauses during the formation of each new film layer, the use of which has made it possible to grow atomically smooth single-crystal CoFeMnSi films up to 20 nm thick. Electron microscopic studies and diffraction analysis of cross-sectional samples of films grown on a substrate have demonstrated that they have a perfect cubic crystalline structure. The position of reflections in the diffraction pattern indicates that the cubic unit cells of the CoFeMnSi film (space group $F\bar{4}3m$) and of MgO(100) crystal are rotated relative to each other by an angle of 45° around the direction of MgO[001], while ensuring their alignment along the CoFeMnSi(202) and MgO(020) planes. The obtained results of the work can be used for the manufacture of multilayer heterostructures and devices based on them.

Keywords: spin gapless semiconductor, spintronics, thin films, laser deposition, epitaxy, single-crystal, CoFeMnSi alloy

Funding: the work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Contract FSMR-2024-0004) and by using equipment of the Research Sharing Center "Diagnostics and modification of microstructures and nanoobjects".

For citation: Veryuzhskii I. V., Prikhodko A. S., Uskov F. A., Grigorashvili Yu. E., Borgardt N. I. Single-Crystalline CoFeMnSi Heusler alloy thin films as prepared by pulsed laser deposition on MgO substrate. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 703–714. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-703-714. – EDN: GTIDDT.

Введение. Спиновые бесщелевые полупроводники – перспективный класс материалов, объединяющий в себе свойства полуметаллических ферромагнетиков и бесщелевых полупроводников [1, 2]. Одним из таких материалов является четверной сплав CoFeMnSi (CFMS), который благодаря своей зонной структуре обеспечивает возможность 100%-ной спиновой поляризации и позволяет использовать эффект Холла для разделения спин-поляризованных электронов и дырок [3]. Пленки CFMS характеризуются высокой температурой Кюри $T_C \approx 778$ К и намагниченностью насыщения $M_s \approx 3{,}42$ μ_B/f.u. (где μ_B – магнетон Бора, f.u. – формульная единица) [4], которая подчиняется правилу Слэтера – Полинга [5]. Структуры на основе CFMS могут сохранять свои уникальные электрические и магнитные свойства при комнатной температуре [6], что существенно расширяет возможности использования устройств спинтроники на их основе.

В настоящее время на базе тонких пленок CFMS создаются различные тестовые спинтронные устройства, такие как магнитные туннельные переходы полупроводник – изолятор – полупроводник, элементы энергонезависимой памяти STT-MRAM, спиновые транзисторы, а также приборы и датчики с магниторезистивными свойствами спиновых бесщелевых полупроводников [7]. Например, для создания магнитных туннельных переходов представляют интерес пленки CFMS толщиной менее 30 нм [8]. Их атомарная структура должна обладать высоким структурным совершенством, поскольку строение пленок CFMS существенно влияет на электрофизические и магнитные свойства создаваемых устройств [9, 10].

Процесс изготовления пленок на основе CFMS включает в себя две стадии [11]. Сначала происходит осаждение распыленного материала на подложку, предварительно нагретую до температуры 500 °C [12]. Затем для кристаллизации слоя CFMS проводится отжиг полученной пленки при температуре 700 °C. Однако пленки CFMS, выращенные описанным способом, несмотря на процесс отжига, имеют несовершенства кристаллической структуры, что может приводить к деградации электрофизических и магнитных характеристик пленок.

Одним из перспективных способов формирования тонких монокристаллических пленок CFMS на кристаллических подложках является метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО). Его суть заключается в испарении (абляции) мишени определенного состава высокоэнергетичным лазерным импульсом с последующим осаждением распыленных частиц на предварительно подготовленную и нагретую поверхность кристаллической подложки [13].

В настоящей работе определяются оптимальные параметры процесса роста CoFeMnSi методом ИЛО, при которых на поверхности кристаллической подложки MgO(100) формируются тонкие монокристаллические пленки CFMS. Во время роста пленок их структурное совершенство оценивается методом дифракции быстрых

электронов на отражение (ДБЭО). Детальные структурные исследования выращенных пленок проводятся с применением метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Экспериментальное оборудование. Для изготовления тонких пленок CFMS использовали установку импульсного лазерного осаждения. Мишень, из которой распылялся материал, представляет собой четвертной сплав Гейслера CoFeMnSi с атомарным соотношением Co:Fe:Mn:Si 1:1:1:1 и чистотой исходных материалов 99,9 %.

Испарение материала мишени проводили импульсным KrF-лазером с длиной волны излучения 248 нм и длительностью импульса 20 нс. Структуру тонких пленок в процессе их роста наблюдали *in-situ* с помощью ДБЭО-системы. Для контроля состава атмосферы в ростовой камере использовали масс-спектрометр. Измерение температуры осуществляли двумя оптическими пирометрами с обеих сторон подложки. Для обеспечения равномерности распыления материала CFMS мишень вращалась со скоростью 10 об./мин с постепенным смещением от ее центра на расстояние в пределах диаметра мишени, равного 25 мм.

Для проведения структурных исследований выращенной на подложке пленки образцы поперечного сечения, параллельного плоскости MgO(001), приготавливали методом *in-situ lift-out* [14] в электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 650. Полученные образцы изучали методами ПЭМ и электронной дифракции в приборе FEI Titan Themis 200 с корректором сферической аберрации в режиме получения изображений при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Формирование монокристаллических пленок CFMS и исследование их структуры. Пленки CFMS выращивали при остаточном давлении в ростовой камере $P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па. Перед каждым процессом осаждения проводили «тренировку» мишени, т.е. предварительное распыление материала мишени на закрытую заслонку, при этом распыленные частицы не осаждались на подложку. Мишень подвергалась облучению лазерными импульсами с частотой 1 Гц и количеством импульсов, равным 3000.

Пленки CFMS наносили на химически чистые монокристаллические подложки MgO(100), хранившиеся в специализированной вакуумной упаковке. Поскольку MgO является гигроскопичным материалом, то для удаления гидратов с поверхности подложки проводили ее нагрев до температуры 1000 ºС в ростовой камере установки ИЛО. Подложку выдерживали при указанной температуре 3 ч в атмосфере кислорода при давлении $P = 1 \cdot 10^{-2}$ Па. Кристаллическое состояние приповерхностной области подложки оценивали по рефлексам на картинах ДБЭО, получаемых в процессе отжига.

Температура подложки при выращивании пленок влияет на миграцию осаждаемых атомов на поверхности подложки. В случае низкой температуры затрудняется перемещение атомов материала мишени по поверхности подложки и занятие ими энергетически выгодных позиций, что приводит к формированию слоя с поликристиллической структурой. Если установленная температура подложки слишком высокая, то возрастает миграционная подвижность атомов. В результате атомы мишени могут либо покидать поверхность подложки из-за десорбции, либо образовывать критические зародыши больших размеров, коалесценция которых приводит к образованию относительно крупных зерен. Проведенные эксперименты позволили установить, что температура подложки, равная 650 ºС, является оптимальной для выращивания пленок CFMS, ее значение оказалось выше значения температуры (500 ºС) при изготовлении пленок

CFMS методом лазерного осаждения [12]. Поэтому после проведенного высокотемпературного отжига устанавливали оптимальное значение температуры подложки, равное 650 ºС. Подложку при данной температуре выдерживали в течение 1 ч перед осаждением пленки CFMS.

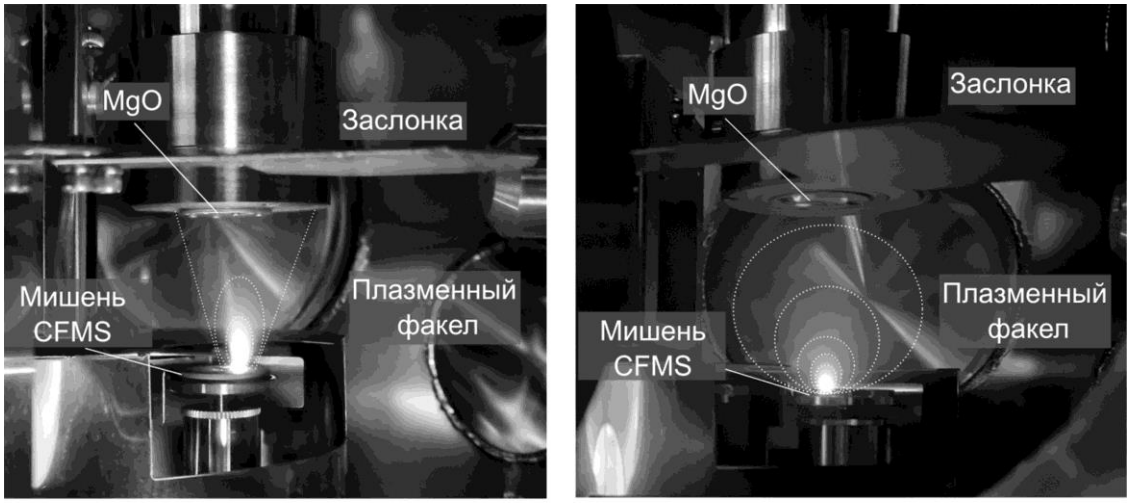
Процесс лазерной абляции при импульсном лазерном осаждении пленок делится на четыре стадии [15]: 1) взаимодействие лазерного излучения с поверхностью мишени, т. е. абляция материала и образование плазменного факела; 2) развитие динамики плазмы факела, связанное с его расширением; 3) осаждение материала на подложку; 4) рост пленки на поверхности подложки.

Плазменный факел состоит из нейтральных атомов, электронов, заряженных ионов и кластеров (конгломератов) материала испаряемой мишени, энергии которых могут варьироваться от единиц до нескольких сотен электрон-вольт [16]. Качество формируемых пленок CFMS в процессе их роста методом ИЛО существенным образом определяет взаимодействие потока этих частиц с подложкой. Энергия распыленных атомов, скорость их осаждения, состояние поверхности подложки, состав и атомная структура выращенной пленки будут зависеть от энергии и частоты лазерного импульса, давления в ростовой камере, а также от расстояния мишень – подложка.

В работе [17] отмечается, что параметры процесса лазерного осаждения должны быть отрегулированы таким образом, чтобы граница шлейфа плазменного факела касалась поверхности подложки. Слишком короткий шлейф не обеспечивает достаточного количества распыленного материала у поверхности подложки для осаждения на нее пленки. Однако в случае слишком длинного шлейфа ухудшаются свойства растущей пленки. Например, в работе [18] показано, что при использовании расстояния мишень – подложка менее 60 мм увеличивается размер зерен в пленках ZnO и повышается их удельное сопротивление. В работе [12] для осаждения пленок CFMS значение расстояния мишень – подложка устанавливалось равным 40 мм. Выращенные пленки имели несовершенства кристаллической структуры даже после проведения термической обработки. Причина различия выбранных значений расстояния мишень – подложка заключается в том, что процессы, возникающие при ИЛО, требуют оптимизации параметров осаждения пленок для каждого используемого соединения материала мишени.

Для определения оптимальных параметров ИЛО проводили серию тестовых процессов по выращиванию пленок CFMS на подложке MgO(100). С целью обеспечения чистоты процесса осаждения дополнительные газы не использовали, а ростовую камеру откачивали до остаточного давления $P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па. Энергия лазера находится в диапазоне 100–230 мДж при максимально возможном значении 400 мДж. Расстояние мишень – подложка устанавливали в диапазоне 35–65 мм, которое является предельным для используемой установки.

На рис. 1, *а* показан плазменный факел, образованный при энергии лазерного импульса 230 мДж и расстоянии мишень – подложка 35 мм. Установлено, что при малом значении расстояния мишень – подложка граница видимой части шлейфа плазменного факела находится в зоне размещения подложки. Из-за высокой энергии распыленных частиц происходит повреждение поверхности подложки, при этом большая часть атомов не закрепляется на поверхности и, потеряв энергию после взаимодействия с подложкой, покидает ее.

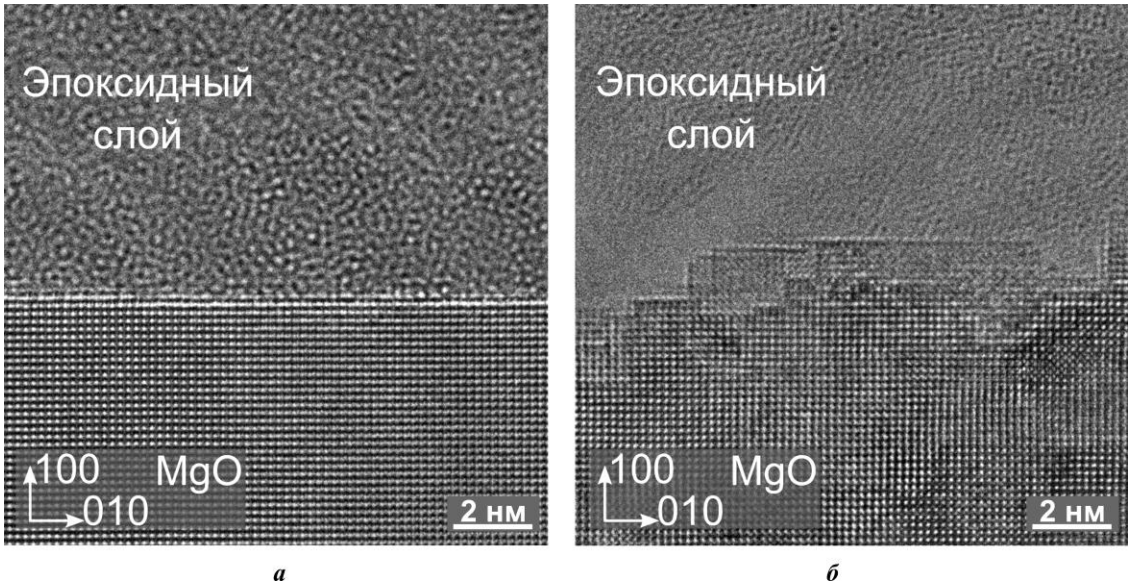


а *б*

Рис. 1. Формирование плазменного факела при импульсном лазерном осаждении пленок CFMS: *а* – энергия импульса 230 мДж, расстояние мишень – подложка 35 мм; *б* – энергия импульса 150 мДж, расстояние мишень – подложка 55 мм (пунктирные линии – условные границы участков факела с разной интенсивностью свечения плазмы)

Fig. 1. Plasma plume formation during pulsed laser deposition of CFMS films: *a* – the pulse energy was 230 mJ, the target – substrate distance was 35 mm; *b* – the pulse energy was 150 mJ, the target – substrate distance was 55 mm (the dashed lines indicate the conditional boundaries of plasma plume sections with different plasma fluorescence intensities)

Поверхность подложки до и после процесса осаждения показана на рис. 2. Энергию частиц, поступающих на подложку, можно уменьшить путем снижения энергии лазерного импульса до 150 мДж и увеличения расстояния мишень – подложка до 55 мм. Форма плазменного факела и интенсивность свечения плазмы изменяются, при этом подложка находится у границы видимой части шлейфа плазменного факела (рис. 1, *б*).



а *б*

Рис. 2. ПЭМ-микрофотографии состояния поверхности подложки MgO(100) до проведения процесса лазерного осаждения пленок CFMS (*а*) и в случае разрушения поверхностного слоя высокоэнергетическими распыленными частицами материала мишени (*б*)

Fig. 2. TEM images of the MgO(100) substrate surface before laser deposition of CFMS films (*a*) and in case of surface layer destruction by high-energy atomized particles of the target material (*b*)

Дальнейшее уменьшение энергии лазерного импульса и увеличение расстояния мишень – подложка приводит к существенному снижению скорости роста пленки и нарушению ее стехиометрии. Поэтому в качестве оптимальной энергии лазерных импульсов выбрано значение 150 мДж, а расстояние мишень – подложка устанавливалось равным 55 мм.

Скорость роста и атомная структура пленки также определяются частотой генерации лазерных импульсов. Если она составляла несколько герц, то на подложке формировались пленки с несовершенной атомарной структурой, что, предположительно, связано с недостаточностью времени для встраивания осаждаемых атомов в энергетически выгодные позиции на поверхности подложки. Поэтому для тестовых нанесений пленок выбрана частота генерации лазерных импульсов f = 1...2 Гц при максимально возможном значении 100 Гц.

На первом этапе роста на поверхности подложки образовывались островки CFMS. Это подтверждается картиной ДБЭО (рис. 3, *а*), на которой визуализируются точечные рефлексы в результате дифракции электронов на атомных плоскостях CFMS. Этот режим роста соответствует механизму Вольмера – Вебера [19, 20]. Если скорость поступления новых атомов будет высокой, то островковый режим роста сохранится. На ПЭМ-микрофоторафии образца поперечного сечения (рис. 3, *б*) показан один из островков материала CFMS, выращенный на поверхности подложки MgO(100).

Снижение скорости осаждения за счет уменьшения частоты импульсов до значений f = 0,5 Гц и использования низкой энергии лазерного импульса E = 150 мДж позволило наблюдать замену островкового режима роста послойно-островковым Странского – Крыстанова [21]. Картина ДБЭО при этом имеет вид, показанный на рис. 3, *в*. В этом режиме первые слои CFMS получаются сплошными, но после достижения критической толщины пленки из-за возникающих напряжений между пленкой и подложкой [22] рост пленки становится островковым (рис. 3, *г*).

Для последовательного роста слоев по методу Франка – Ван дер Мерве [23] атомам, осаждаемым на поверхность, необходимо время для образования нового слоя, чтобы они могли занять энергетически выгодные позиции. Это достигалось путем введения временных пауз после осаждения каждого нового слоя CFMS. Для определения количества импульсов, необходимых для формирования одного слоя, проведены расчеты с использованием данных о толщине получаемых пленок. Установлено, что при выбранных условиях осаждения пленок CFMS необходимо после каждых 65 лазерных импульсов, облучающих мишень, делать паузы, длительность которых должна составлять около 2 мин. Такие временные задержки в процессе формирования пленки позволяют атомам CFMS заполнять пространство между образовавшимися островками. При толщине слоя CFMS более 2 нм островки сливаются в однородную пленку с монокристаллической структурой, что подтверждается непрерывными тяжами на картине ДБЭО (см. рис. 3, *д*).

Дальнейший рост пленок осуществлялся в послойном режиме. ПЭМ-микрофотография образца поперечного сечения (рис. 3, *е*) показывает, что выращенная пленка CFMS на подложке MgO(100) непрерывна и атомарно гладкая, ее толщина остается постоянной и составляет около 12 нм. На вставке рис. 3, *е* представлена дифракционная картина, полученная от пленки CFMS и подложки вдоль направления MgO[001] с применением селективной диафрагмы, которая выделяет круглую область на образце диаметром 650 нм. Квадратом на этой вставке выделены рефлексы, соответствующие отражениям от плоскостей {200} подложки MgO, ромбом – ближайшие к центру рефлексы от пленки CFMS, точечный вид которых свидетельствуют о ее монокристалличности.

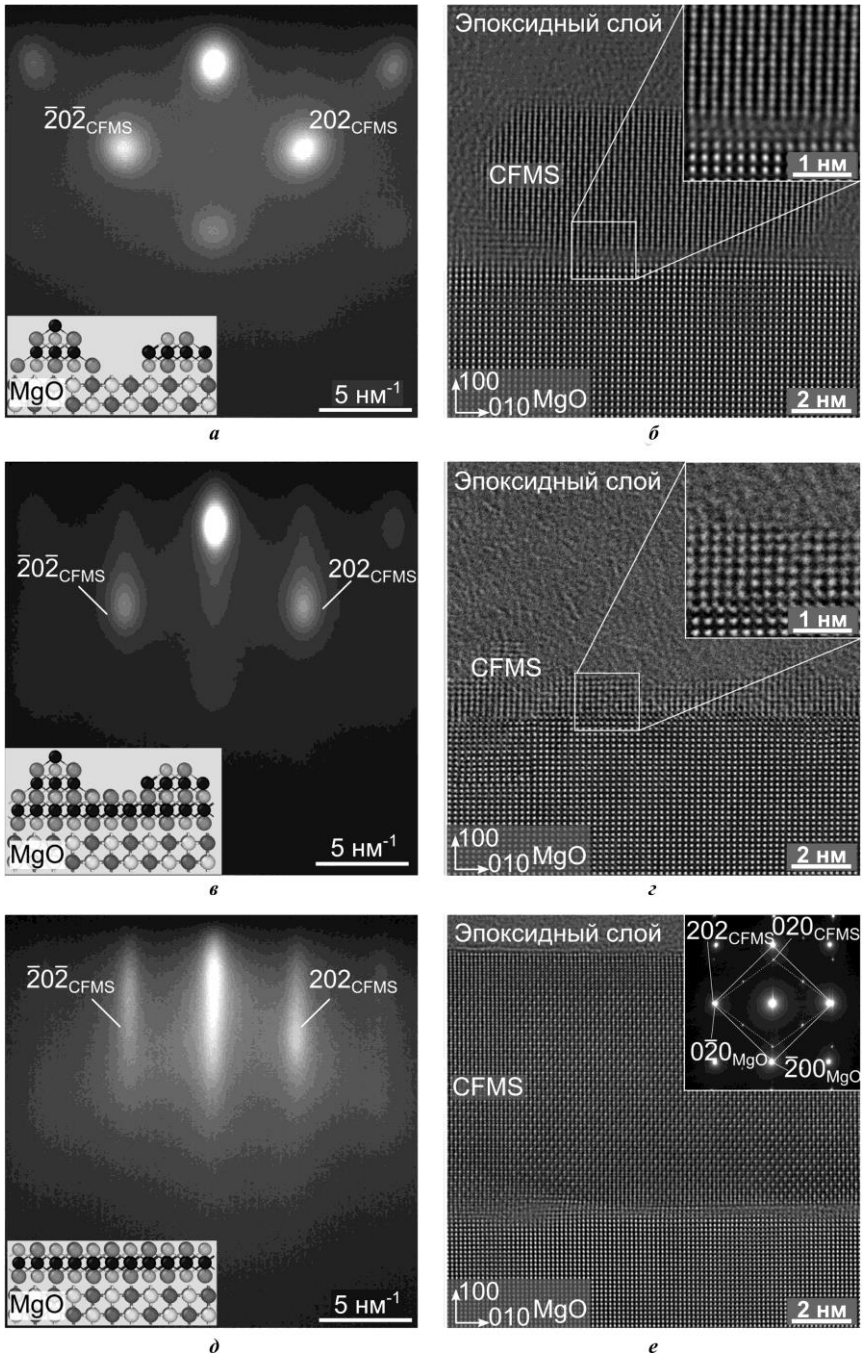


Рис. 3. Рост пленок CFMS на подложке MgO(100): *а* – ДБЭО-картина от пленки CFMS, выращенной в островковом режиме на подложке MgO(100); *б* – ПЭМ-микрофотография выращенного островка CFMS на подложке MgO(100); *в* – ДБЭО-картина от пленки, выращенной в режиме послойно-островкового роста; *г* – ПЭМ-микрофотография формирования первых слоев пленки (далее наблюдается замена островкового режима роста послойно-островковым); *д* – ДБЭО-картина от пленки, выращенной в режиме послойного роста; *е* – ПЭМ-микрофотография, подтверждающая высокое монокристаллическое качество пленки CFMS

Fig. 3. The growth of the CFMS films on MgO(100) substrate: *a* – RHEED pattern taken for CFMS film grown in the island mode on MgO(100) substrate; *b* – TEM image showing the CFMS island grown on MgO(100) substrate; *c* – RHEED pattern taken for CFMS film grown in layer-by-layer island growth mode; *d* – TEM image showing the formation of the first layers of the film, followed by a change of the island growth mode to layer-by-island growth; *e* – RHEED pattern taken for CFMS film grown in layer-by-layer growth mode; *f* – TEM image confirming the high single-crystal quality of the CFMS film

Положение рефлексов на дифракционной картине указывает на то, что кубические элементарные ячейки пленки CFMS (пространственная группа $F\bar{4}3m$) и кристалла MgO(100) повернуты относительно друг друга на угол 45° вокруг направления MgO[001]. Такое взаимное расположение кристаллических решеток указывает на ориентирующее влияние трансляционной симметрии подложки на расположение атомов в выращенной пленке. При этом обеспечивается их согласование по плоскостям CFMS(202) и MgO(020), которые имеют близкое межплоскостное расстояние, что обусловливает возникновение составного рефлекса на дифракционной картине.

Заключение. В результате проведенных исследований определены оптимальные параметры процесса выращивания тонких монокристаллических пленок CFMS на подложках MgO(100) методом импульсного лазерного осаждения. Продемонстрировано, что применение установленных значений температуры подложки MgO(100), расстояния мишень – подложка, энергии и частоты генерации импульсного лазерного облучения мишени CoFeMnSi на поверхности MgO(100), а также введение двухминутных пауз при формировании каждого нового слоя позволяют вырастить атомарно гладкие пленки CFMS толщиной до 20 нм. Их структурное совершенство подтверждается данными ПЭМ. Такие пленки имеют наилучшие электрические и магнитные характеристики и представляют интерес для создания приборов спинтроники.

Литература

1. Heusler alloys for spintronic devices: Review on recent development and future perspectives / ***K. Elphick, W. Frost, M. Samiepour et al.*** // Sci. Technol. Adv. Mater. 2021. Vol. 22. Iss. 1. P. 235–271. https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1812364

2. ***Rani D., Bainsla L., Ablam A., Suresh K. G.*** Spin-gapless semiconductors: Fundamental and applied aspects // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128. Iss. 22. Art. No. 220902. https://doi.org/10.1063/5.0028918

3. ***Han J., Feng Y., Yao K., Gao G. Y.*** Spin transport properties based on spin gapless semiconductor CoFeMnSi // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 111. Iss. 13. Art. No. 132402. https://doi.org/10.1063/1.4999288

4. Investigation of spin gapless semiconducting behavior in quaternary CoFeMnSi Heusler alloy thin films on Si(100) / ***V. Mishra, V. Barwal, L. Pandey et al.*** // J. Magn. Magn. Mater. 2022. Vol. 547. Art. ID: 168837. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168837

5. ***Tan X., You J., Liu P.-F., Wang Y.*** Theoretical study of the electronic, magnetic, mechanical and thermodynamic properties of the spin gapless semiconductor CoFeMnSi // Crystals. 2019. Vol. 9. Iss. 12. Art. No. 678. https://doi.org/10.3390/cryst9120678

6. Magnetic tunnel junction with an equiatomic quaternary CoFeMnSi Heusler alloy electrode / ***L. Bainsla, K. Z. Suzuki, M. Tsujikawa et al.*** // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 112. Iss. 5. Art. No. 052403. https://doi.org/10.1063/1.5002763

7. ***Фетисов Ю. К., Сигов А. С.*** Спинтроника: физические основы и устройства // РЭНСИТ. 2018. Т. 10. № 3. С. 343–356.

8. Chemical and structural analysis on magnetic tunnel junctions using a decelerated scanning electron beam / ***E. Jackson, M. Sun, T. Kubota et al.*** // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. Art. No. 7585. https://doi.org/10.1038/s41598-018-25638-8

9. Investigation of perpendicular magnetic anisotropy in CoFeMnSi based heterostructures / ***L. Saravanan, V. Mishra, L. Pandey et al.*** // J. Magn. Magn. Mater. 2022. Vol. 561. Art. ID: 169693. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169693

10. Structures, magnetism and transport properties of the potential spin-gapless semiconductor CoFeMnSi alloy / ***H. Fu, Y. Li, L. Ma et al.*** // J. Magn. Magn. Mater. 2019. Vol. 473. P. 16–20. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.040

11. Structural and magnetic properties of epitaxial thin films of the equiatomic quaternary CoFeMnSi Heusler alloy / ***L. Bainsla, R. Yilgin, J. Okabayashi et al.*** // Phys. Rev. B. 2017. Vol. 96. Iss. 9. Art. No. 094404. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.094404

12. ***Kushwaha V. K., Rani J., Tulapurkar A., Tomy C. V.*** Possible spin gapless semiconductor type behavior in CoFeMnSi epitaxial thin films // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 11. Iss. 15. Art. No. 152407. https://doi.org/10.1063/1.4996639

13. ***Greer J. A.*** History and current status of commercial pulsed laser deposition equipment // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. No. 3. Art. No. 034005. https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/3/034005

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

15. ***Булаев С. А.*** Сущность импульсного лазерного напыления в вакууме как способа получения пленок нанометровой толщины // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 18. С. 25–28. EDN: SXYGFX.

16. ***Кузнецов И. А., Гараева М. Я., Мамичев Д. А., Занавескин М. Л.*** Формирование ультрагладких тонких пленок серебра методом импульсного лазерного осаждения // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 5. С. 725–729. https://doi.org/10.7868/S0023476113030090. – EDN: QYNFFB.

17. ***Morintale E., Constantinescu C., Dinescu M.*** Thin films development by pulsed laser-assisted deposition // Physics AUC. 2010. Vol. 20 (1). P. 43–56.

18. Влияние процессов в факеле при лазерной абляции на удельное сопротивление и морфологию нанокристаллических пленок ZnO / ***О. А. Агеев, А. П. Достанко, Е. Г. Замбург и др.*** // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 10. С. 2037–2042. EDN: UJMJFJ.

19. ***Venables J. A.*** Surface processes in thin film devices // Introduction to surface and thin film processes / J. A. Venables. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. P. 260–296. https://doi.org/10.1017/CBO9780511755651.009

20. Growth and *in situ* high-pressure reflection high energy electron diffraction monitoring of oxide thin films / ***J. Li, W. Peng, K. Chen et al.*** // Sci. China Phys. Mech. Astron. 2013. Vol. 56. P. 2312–2326. https://doi.org/10.1007/s11433-013-5352-6

21. ***Baskaran A., Smereka P.*** Mechanisms of Stranski-Krastanov growth // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111. Iss. 4. Art. No. 044321. https://doi.org/10.1063/1.3679068

22. ***Шугуров А. Р., Панин А. В.*** Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 12. С. 1971–1994. https://doi.org/10.21883/jtf.2020.12.50417.38-20. – EDN: VBXWWO.

23. ***Braun A., Diale M., Malherbe J., Braun M.*** Introduction: Jan van der Merwe. Epitaxy and the computer age // J. Mater. Res. 2017. Vol. 32. P. 3921–3923. https://doi.org/10.1557/jmr.2017.426

Статья поступила в редакцию 19.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 16.09.2024 г.;
принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Верюжский Иван Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории сверхпроводниковой микроэлектроники Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vervan2005@mail.ru

Приходько Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sashaprixodko@gmail.com

Усков Филипп Александрович – инженер научно-исследовательской лаборатории сверхпроводниковой микроэлектроники Института физики и прикладной математики, аспирант Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), phil1997@inbox.ru

Григорашвили Юрий Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательской лаборатории сверхпроводниковой микроэлектроники Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yegrig@rambler.ru

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

References

1. Elphick K., Frost W., Samiepour M., Kubota T., Takanashi K., Sukegawa H., Mitani S., Hirohata A. Heusler alloys for spintronic devices: Review on recent development and future perspectives. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2021, vol. 22, iss. 1, pp. 235–271. https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1812364

2. Rani D., Bainsla L., Ablam A., Suresh K. G. Spin-gapless semiconductors: Fundamental and applied aspects. *J. Appl. Phys.*, 2020, vol. 128, iss. 22, art. no. 220902. https://doi.org/10.1063/5.0028918

3. Han J., Feng Y., Yao K., Gao G. Y. Spin transport properties based on spin gapless semiconductor CoFeMnSi. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 111, iss. 13, art. no. 132402. https://doi.org/10.1063/1.4999288

4. Mishra V., Barwal V., Pandey L., Gupta N. K., Hait S., Kumar A., Sharma N. et al. Investigation of spin gapless semiconducting behavior in quaternary CoFeMnSi Heusler alloy thin films on Si(100). *J. Magn. Magn. Mater.*, 2022, vol. 547, art. ID: 168837. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168837

5. Tan X., You J., Liu P.-F., Wang Y. Theoretical study of the electronic, magnetic, mechanical and thermodynamic properties of the spin gapless semiconductor CoFeMnSi. *Crystals*, 2019, vol. 9, iss. 12, art. no. 678. https://doi.org/10.3390/cryst9120678

6. Bainsla L., Suzuki K. Z., Tsujikawa M., Tsuchiura H., Shirai M., Mizukami Sh. Magnetic tunnel junction with an equiatomic quaternary CoFeMnSi Heusler alloy electrode. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, iss. 5, art. no. 052403. https://doi.org/10.1063/1.5002763

7. Fetisov Yu. K., Sigov A. S. Spintronics: Physical foundations and devices. *RENSIT*, 2018, vol. 10 (3), pp. 343–356. https://doi.org/10.17725/rensit.2018.10.343. – EDN: YPXQLJ.

8. Jackson E., Sun M., Kubota T., Takanashi K., Hirohata A. Chemical and structural analysis on magnetic tunnel junctions using a decelerated scanning electron beam. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, art. no. 7585. https://doi.org/10.1038/s41598-018-25638-8

9. Saravanan L., Mishra V., Pandey L., Gupta N. K., Kumar N., Gopalan R., Prabhu D. et al. Investigation of perpendicular magnetic anisotropy in CoFeMnSi based heterostructures. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2022, vol. 561, art. ID: 169693. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169693

10. Fu H., Li Y., Ma L., You C., Zhang Q., Tian N. Structures, magnetism and transport properties of the potential spin-gapless semiconductor CoFeMnSi alloy. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2019, vol. 473, pp. 16–20. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.040

11. Bainsla L., Yilgin R., Okabayashi J., Ono A., Suzuki K., Mizukami Sh. Structural and magnetic properties of epitaxial thin films of the equiatomic quaternary CoFeMnSi Heusler alloy. *Phys. Rev. B*, 2017, vol. 96, iss. 9, art. no. 094404. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.094404

12. Kushwaha V. K., Rani J., Tulapurkar A., Tomy C. V. Possible spin gapless semiconductor type behavior in CoFeMnSi epitaxial thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 11, iss. 15, art. no. 152407. https://doi.org/10.1063/1.4996639

13. Greer J. A. History and current status of commercial pulsed laser deposition equipment. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, vol. 47, no. 3, art. no. 034005. https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/3/034005

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

15. Bulaev S. A. Pulsed laser deposition in vacuum as a method for producing films of nanometer thickness. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 18, pp. 25–28. (In Russian). EDN: SXYGFX.

16. Kuznetsov I. A., Garaeva M. Ya., Mamichev D. A., Grishchenko Yu. V., Zanaveskin M. L. Formation of ultrasmooth thin silver films by pulsed laser deposition. *Crystallogr. Rep.*, 2013, vol. 58, pp. 739–742. https://doi.org/10.1134/S1063774513030097

17. Morintale E., Constantinescu C., Dinescu M. Thin films development by pulsed laser-assisted deposition. *Physics AUC*, 2010, vol. 20 (1), pp. 43–56.

18. Ageev O. A., Dostanko A. P., Zamburg E. G., Konoplev B. G., Polyakov V. V., Cherednichenko D. I. Effect of the processes in the laser ablation plume on the resistivity and morphology of nanocrystalline ZnO films. *Phys. Solid State*, 2015, vol. 57, pp. 2093–2098. https://doi.org/10.1134/S1063783415100029

19. Venables J. A. Surface processes in thin film devices. *Introduction to surface and thin film processes*, by J. A. Venables. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2000, pp. 260–296. https://doi.org/10.1017/CBO9780511755651.009

20. Li J., Peng W., Chen K., Wang P., Chu H.-F., Chen Y.-F., Zheng D.-N. Growth and *in situ* high-pressure reflection high energy electron diffraction monitoring of oxide thin films. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2013, vol. 56, pp. 2312–2326. https://doi.org/10.1007/s11433-013-5352-6

21. Baskaran A., Smereka P. Mechanisms of Stranski-Krastanov growth. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 111, iss. 4, art. no. 044321. https://doi.org/10.1063/1.3679068

22. Shugurov A. R., Panin A. V. Mechanisms of stress generation in thin films and coatings. *Tech. Phys.*, 2020, vol. 65, pp. 1881–1904. https://doi.org/10.1134/S1063784220120257

23. Braun A., Diale M., Malherbe J., Braun M. Introduction: Jan van der Merwe. Epitaxy and the computer age. *J. Mater. Res.*, 2017, vol. 32, pp. 3921–3923. https://doi.org/10.1557/jmr.2017.426

The article was submitted 19.08.2024; approved after reviewing 16.09.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Ivan V. Veriuzhskii – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Superconducting Microelectronics Research Laboratory, Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vervan2005@mail.ru

Alexandr S. Prihodko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy, Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sashaprixodko@gmail.com

Philip A. Uskov – Engineer of the Superconducting Microelectronics Research Laboratory, Institute of Physics and Applied Mathematics, PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), phil1997@inbox.ru

Yury E. Grigorashvili – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, Head of the Superconducting Microelectronics Research Laboratory, Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yegrig@rambler.ru

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

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 546.05:546.121:546.28-121:548.522:548.55
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-715-723
EDN: FZMNDT

Исследование процесса многослойного роста поликристаллических кремниевых слоев для управления деформацией кремниевых структур в технологии химического газового транспорта

***Д. В. Тарасов*[1,2], *Е. М. Соколов*[1], *С. А. Гаврилов*[2]**

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

tarasov@epiel.ru

Аннотация. Кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией, структуры кремний на изоляторе и соединения нитридов III группы на кремнии (AlN/Si, GaN/Si и др.) чаще всего применяются в силовой электронике. Одна из проблем в производстве таких структур – сложная деформация (прогиб или коробление) структур в результате использования относительно толстого слоя поликремния в качестве опорной конструкции для монокристаллических кремниевых областей. В работе исследованы зависимости механических свойств поликристаллических кремниевых слоев от температуры роста при осаждении их методом химического газотранспортного переноса. Показаны зависимости свойств поликремния от состава и соотношения газовых реагентов в процессе осаждения. Для хлоридной и бромидной атмосфер установлены оптимальные диапазоны рабочих температур и рабочего соотношения хлора и брома в газовой среде. Выявлено, что основным технологическим параметром, определяющим прогиб кремниевых структур и его направление, является температура роста поликристаллического кремниевого слоя. Приведены результаты заращивания канавок в кремниевых структурах с диэлектрической изоляцией при формировании опорного слоя. Полученные результаты имеют практическое значение для технологии создания полупроводниковых приборов силовой электроники.

Ключевые слова: химический газотранспортный перенос, поликремний, ростовые напряжения, прогиб структуры, кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией, кремний на изоляторе

Для цитирования: Тарасов Д. В., Соколов Е. М., Гаврилов С. А. Исследование процесса многослойного роста поликристаллических кремниевых слоев для управления деформацией кремниевых структур в технологии химического газового транспорта // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 715–723. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-715-723. – EDN: FZMNDT.

© Д. В. Тарасов, Е. М. Соколов, С. А. Гаврилов, 2024

Original article

Research of multilayer growth process of polycrystalline silicon layers for silicon structures deformation control in chemical gas transport technology

***D. V. Tarasov*[1,2], *E. M. Sokolov*[1], *S. A. Gavrilov*[2]**

[1]*Epiel JSC, Moscow, Russia*
[2]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

tarasov@epiel.ru

Abstract. Silicon structures with dielectric isolation, silicon-on-insulator structures, and III-N compounds on silicon (AlN/Si, GaN/Si, etc.) are most commonly used in power electronics. One of the problems in such structures manufacturing is the complex deformation (bow or warp) of structures due to the use of a relatively thick layer of polysilicon as a support structure for monocrystalline silicon areas. In this work, the dependences of the mechanical properties of polycrystalline silicon layers on the growth temperature during their deposition by chemical gas transport are studied. The dependencies of polysilicon properties on the composition and ratio of gas reagents during the deposition process were demonstrated. For chloride and bromide atmospheres, the optimum operating temperature ranges and the working ratio of chlorine and bromine in a gas environment have been established. It was found that the main technological parameter determining the magnitude and direction of the bow of silicon structures is the growth temperature of the polysilicon layer. The results of trench filling in dielectric isolation structures during the support layer formation are given. The obtained results have a practical bearing on the technology of semiconductor devices creation for power electronics.

Keywords: chemical gas transport, CVT, polycrystalline silicon, growth stress, bow of structure, dielectric isolation structures, DI, silicon-on-insulator, SOI

For citation: Tarasov D. V., Sokolov E. M., Gavrilov S. A. Research of multilayer growth process of polycrystalline silicon layers for silicon structures deformation control in chemical gas transport technology. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 715–723. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-715-723. – EDN: FZMNDT.

Введение. Развитие силовой электроники требует эффективных и экономичных подходов при производстве микроэлектронных приборов [1]. Для обеспечения необходимых параметров силовых приборов применяются специальные кремниевые структуры, как правило, с диэлектрической изоляцией, структуры кремний на изоляторе и соединения нитридов металлов III группы [2, 3]. Такие структуры должны иметь поликристаллические слои толщиной более 400 мкм, используемые в качестве опорной конструкции [4–6].

Метод химического газотранспортного переноса (Chemical Vapor Transport, CVT) кремния в сэндвич-системе (система с малым зазором) позволяет решить задачу получения толстых слоев кремния [7]. Принцип этого метода заключается в переносе кремния от твердого источника через газообразные галогениды кремния на подложку при атмосферном давлении. Метод газотранспортного йодидного переноса кремния при атмосферном давлении (Atmospheric Pressure Iodine Vapor Transport, APIVT) [8] осно-

вывается на реакции диспропорционирования SiI_2 [9]. Данный метод применяется для выращивания слоев кремния, предназначенных для солнечных элементов и других фотовольтаических приборов. Максимальная скорость роста слоя поликремния с характерным размером кристаллического зерна 5–20 мкм составляет 3 мкм/мин, диапазон ростовых температур 750–950 °С [10]. CVT-метод [7], разработанный на основе APIVT-метода, позволяет наращивать как поли-, так и монокристаллические слои кремния со скоростями, большими, чем часто применяемый метод химического осаждения из паровой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD) [11].

Основная проблема в технологии производства кремниевых структур с диэлектрической изоляцией, структур кремний на изоляторе и соединений нитридов III группы на кремнии – деформация исходных пластин, происходящая при осаждении слоя поликремния и формировании переходов в монокремнии и вызванная ростовыми напряжениями растяжения. Деформация структур отрицательно сказывается на проведении дальнейших технологических операций (шлифовки, полировки, формировании монокристаллических участков для будущих приборов).

Напряжения в структуре, вызывающие прогиб, состоят из термических напряжений ввиду различия в коэффициентах термического расширения слоя и подложки, а также напряжений, возникающих из-за способа роста слоя [12, 13]. Отметим, что коэффициенты термического расширения подложки и слоя почти одинаковые. Напряжения в слое поликремния возникают при высоких температурах во время процесса, и эти напряжения могут быть вызваны механизмом, подобным спеканию.

В работах [5, 14, 15] описан подход к управлению деформацией с применением многослойной поликремниевой структуры, состоящей из чередующихся слоев поликремния или Si/SiO_2. При использовании данного подхода можно контролировать деформацию и повышать точность и эффективность процесса изготовления кремниевых структур.

Цель настоящей работы – исследование и отработка способов управления деформацией кремниевых структур, изготовленных CVT-методом.

Эксперимент и методы исследования. Поликристаллические кремниевые слои выращивали в горизонтальном кварцевом реакторе в атмосфере газообразных галогенидов HCl и HBr при атмосферном давлении. Образцы с наращенным слоем поликремния толщиной 250–500 мкм получены при температуре в диапазоне 930–1130 °С. Скорость роста осаждаемых слоев поликремния изменяли в широком диапазоне – от 1,5 мкм/мин при минимальных значениях температуры до 37 мкм/мин при максимальной температуре процесса роста. Наличие пор и пустот в наращиваемых слоях кремния исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Оценивали также минимальный размер зерна поликремния.

Для количественного определения деформации применяли формулу Стони [16, 17]. В основе методики вычисления – использование радиуса кривизны ρ структуры, изогнутой за счет разницы коэффициентов термического расширения слоя и подложки $\Delta\alpha$ и разницы между температурой осаждения и комнатной температурой Δt. По рассчитанному параметру $\Delta\alpha$ можно определить характер и деформацию структуры. Для оценки кривизны полученных структур измеряли прогиб данных пластин. Поверхность анализировали на оптическом профилометре Veeco Wyko NT9300 в режиме VSI с объективом 2,5X. Измерения проводили по двум взаимно перпендикулярным диаметрам.

Результаты и их обсуждение. Эксперимент с достижением больших скоростей роста для хлоридного HCl CVT-метода описан ранее [15]. В настоящей работе в качестве газового реагента применяли бромистый водород HBr. На рис. 1 приведена сравнительная зависимость скорости роста слоя поликремния от температуры подложки в разных газовых атмосферах.

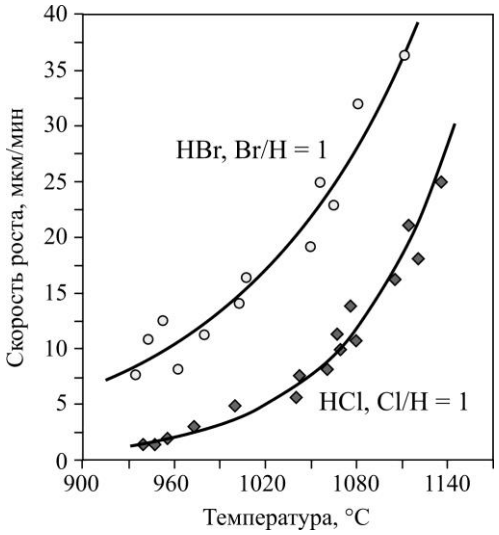


Рис. 1. Зависимость скорости роста слоя поликремния от температуры подложки в атмосферах HCl и HBr

Fig. 1. Dependence of the growth rate of the polysilicon layer on the substrate temperature in HCl and HBr atmospheres

При выращивании слоя поликремния в атмосфере HBr достигнуты значения скоростей роста 35–37 мкм/мин при значениях температуры кремниевой подложки около 1130 °C, что на 25 % выше скорости роста в атмосфере HCl при тех же условиях. Это связано с тем, что связь Si–Br (280 кДж/моль) меньше, чем связь Si–Cl (356 кДж/моль), и ее легче разорвать. Далее установлены наименьшие значения скорости роста поликремния в атмосфере HBr, равные 7,5–8,0 мкм/мин при температуре роста на поверхности подложки около 930 °C.

В работах [5, 12, 13] дано объяснение появлению прогиба у кремниевых структур с диэлектрической изоляцией и структур кремний на изоляторе при росте слоев поликремния. Следует отметить, что прогиб структур вызван ростовыми напряжениями растяжения, генерированными за счет сжатия растущего слоя поликремния. Растягивающие напряжения возникают в результате внутренней перегруппировки осаждаемых атомов под растущей поверхностью слоя.

Эксперименты по оценке возможности управления прогибом проведены и в атмосфере HBr. В этих экспериментах, так же как и в экспериментах в атмосфере HCl, подтверждено, что мелкозернистая структура поликремния в процессе роста имеет другой характер кривизны. Это позволяет выгибать подложку в противоположную сторону по сравнению с высокотемпературным (более 1000 °C) режимом осаждения слоя поликремния. На рис. 2 приведен результат этих экспериментов.

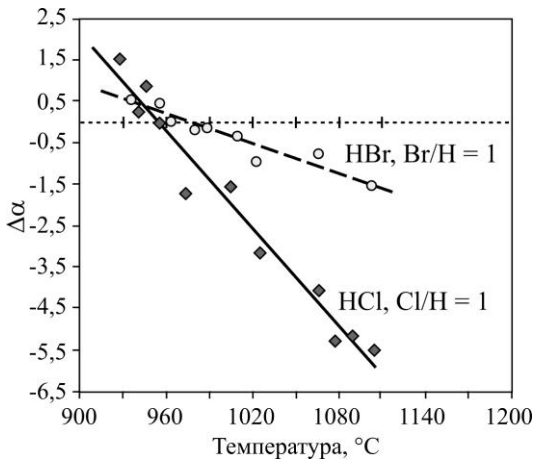


Рис. 2. Температурная зависимость деформации слоя поликремния при росте в атмосферах HCl и HBr

Fig. 2. Temperature dependence of polysilicon layer deformation during growth in HCl and HBr atmospheres (Δα – coefficient of the difference between the coefficient of thermal expansion values of a mono and polycrystalline silicon layer)

Как видно из рис. 2, при температурах ниже 970 °C удалось достичь нулевого значения прогиба структур кремния, а в отдельных экспериментах структура изменила направление деформации в противоположную сторону. Данная температурная область является оптимальной для выращивания слоя поликремния без значительных прогибов и позволяет держать деформацию в зоне, близкой к нулевой. Этой области соответствует скорость роста ~ 8 мкм/мин, что позволило нарастить слой поликремния толщиной 400 мкм менее чем за 60 мин (в атмосфере HCl скорость роста 2 мкм/мин и более 3 ч наращивания). Применение HBr позволяет более плавно управлять прогибом кремниевых структур в диапазоне температур 900–1100 °C (см. рис. 2).

Дополнительно проведены эксперименты, в которых изменяли соотношения хлора

и брома в газовой атмосфере при разной температуре. Установлено, что хлоридный процесс при температуре выше 1000 °С не позволяет достичь минимального прогиба структуры, несмотря на изменения соотношения Cl/H в диапазоне 0,25–1,1 (рис. 3, *а*). Все полученные образцы имели преимущественно вогнутую деформацию (отрицательный прогиб). Бромидный процесс характеризуется аналогичной сложностью управления прогибом структур. На рис. 3, *б* продемонстрирован результат эксперимента с разбавлением HBr. Установлено, что при температуре выше 1000 °С кремниевые структуры с толщиной наращенного слоя 250–500 мкм имеют большие значения прогиба за счет напряжений растяжения в растущем слое.

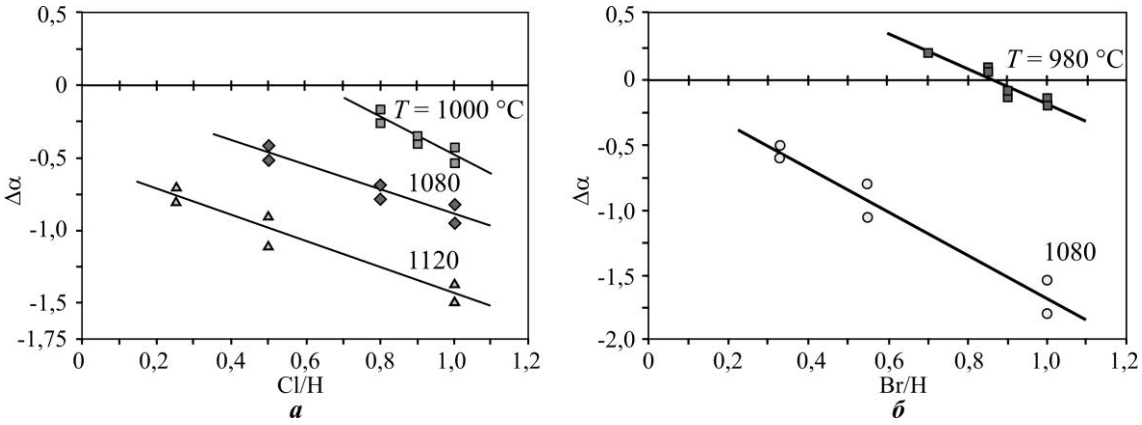


Рис. 3. Зависимость деформации слоя поликремния от соотношения газовых реагентов при разной температуре: *а* – атмосфера HCl; *б* – атмосфера HBr

Fig. 3. Dependence of the deformation of the polysilicon layer on the ratio of gas reagents at different temperatures: *a* – HCl atmosphere; *b* – HBr atmosphere

При соотношении Cl/H или Br/H менее 0,8 резко падает скорость роста слоя поликремния (рис. 4). Такое значительное падение скорости роста делает процесс производства кремниевых структур более затратным по времени и материалам. В связи с этим для HCl (рис. 3, *а* и 4, *а*) и HBr (рис. 3, *б* и 4, *б*) атмосфер установлены оптимальные значения рабочих температур (не выше 980–1000 °С) и рабочего соотношения хлора и брома в газовой среде (от 0,8 до 1).

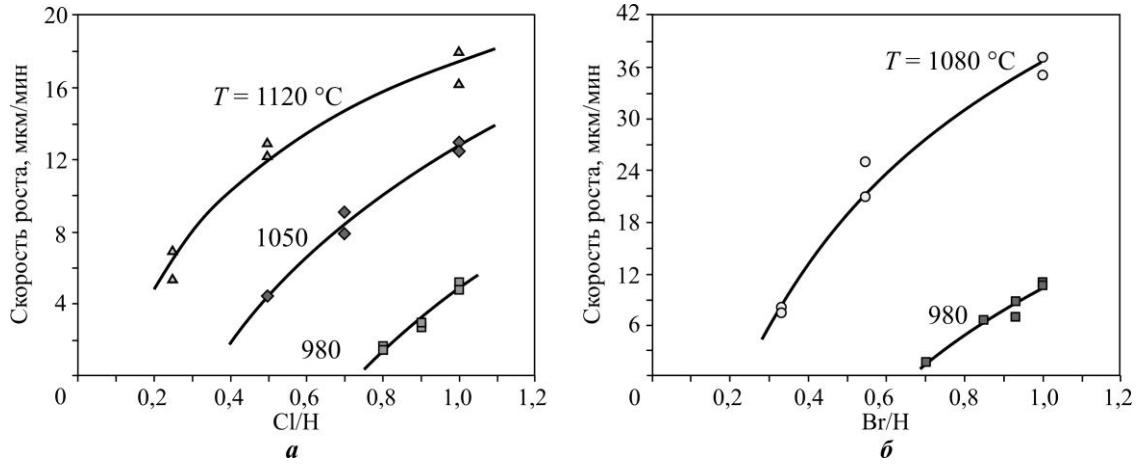
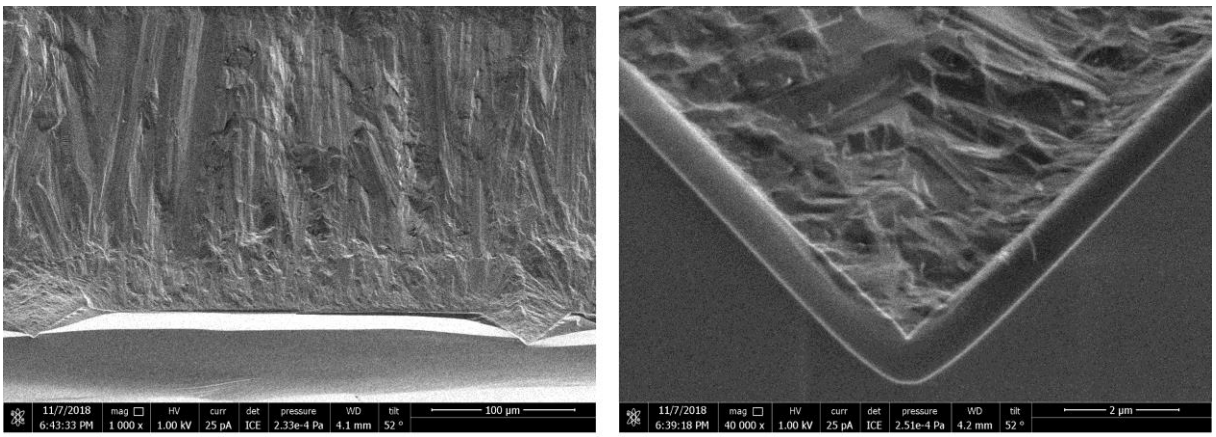


Рис. 4. Зависимость скорости роста слоя поликремния от соотношения газовых реагентов при разной температуре: *а* – атмосфера HCl; *б* – атмосфера HBr

Fig. 4. Dependence of the growth rate of the polysilicon layer on the ratio of gas reagents at different temperatures: *a* – HCl atmosphere; *b* – HBr atmosphere

На следующем этапе оценивали минимальный размер зерна наращиваемого поликремния, а также исследовали слои на наличие пор и пустот. На рис. 5 представлены РЭМ-изображения полученных слоев поликремния. Видно, что осаждаемый слой растет без пор и пустот (рис. 5, *а*). На рис. 5, *б* показана V-образная канавка с мелкозернистым слоем поликремния, что свидетельствует о сравнимой со стандартным CVD-методом плотности покрытия поверхности подложки. Минимальный размер зерна поликремния составил около 0,5 мкм.

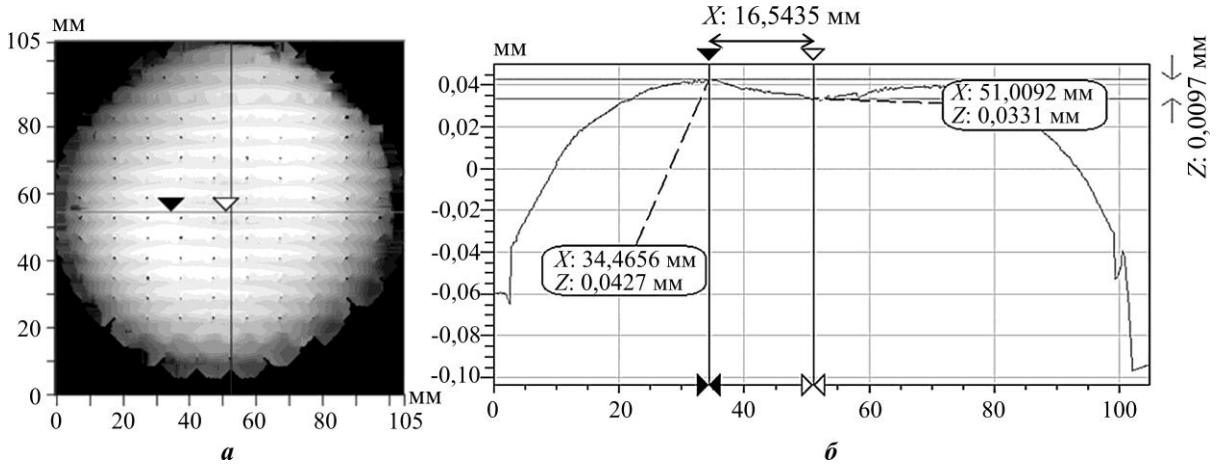


а *б*

Рис. 5. РЭМ-изображения слоев поликремния, полученных CVT-методом на кремниевых подложках, для структур с диэлектрической изоляцией: *а* – область перехода мелкозернистого слоя поликремния в столбчатую структуру; *б* – V-образная канавка со слоем оксида кремния толщиной 1 мкм

Fig. 5. SEM images of polycrystalline silicon layers obtained by the CVT method on silicon substrates for structures with dielectric insulation: *a* – the region of transition of the fine-grained polysilicon layer into a columnar structure; *b* – V-shaped groove with a 1 µm thick silicon oxide layer

Далее опробован способ многослойного осаждения слоев поликремния толщиной 250–500 мкм для получения кремниевых структур с управляемым прогибом. При совмещении низкотемпературного (950 °С) и высокотемпературного (1100 °С) наращиваний получены кремниевые структуры с толщиной слоя поликремния 400 мкм. На рис. 6 и 7 показаны результаты экспериментов. На рис. 6 приведены 2D-карта исходной пластины без многослойного процесса, а также профиль поверхности структуры. Заметна



а *б*

Рис. 6. 2D-картирование (*а*) и профиль поверхности (*б*) кремниевой структуры без многослойного осаждения

Fig. 6. 2D mapping (*a*) and a silicon structure surface profile (*b*) without multilayer deposition

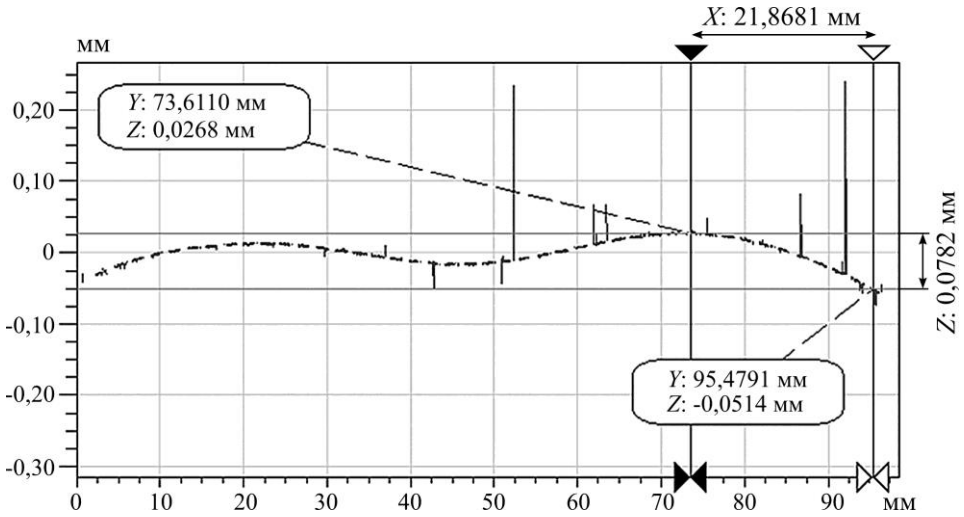


Рис. 7. Профиль поверхности кремниевой структуры вдоль направления, пересекающего базовый срез, после многослойного осаждения
Fig. 7. Silicon structure surface profile along the direction intersecting the base cut after multilayer deposition

сильная деформация подложки кремния при использовании стандартного хлоридного CVT-метода. Проведенные исследования показали изменение характера кривизны с М-образного на волновой (см. рис. 7), т. е. краевые области уже не имеют ярко выраженной деформации. Остаточное небольшое коробление структуры не сказывается негативно на дальнейшие операции производства полупроводниковых приборов.

Заключение. Исследования показали, что в атмосфере HBr скорость роста слоя поликремния составляет 35–37 мкм/мин. Это является максимальным значением. Эксперименты с изменением состава газовой среды позволили установить оптимальные технологические параметры CVT-метода как для HCl, так и для HBr. В ходе работы подтверждено, что основной технологический параметр, определяющий прогиб (деформацию) кремниевых структур и его направление, – температура наращивания слоев поликремния.

Для кремниевых структур с диэлектрической изоляцией отработаны режимы многослойного осаждения поликристаллических кремниевых слоев. Данные режимы позволяют управлять деформацией получаемых структур в широком диапазоне значений прогиба. Структуры с полученным малым значением прогиба переданы предприятию-производителю полупроводниковых приборов для прохождения последующих технологических операций. Отработка процесса получения структур кремния для соединения нитридов III группы продолжается.

Литература

1. ***Макушин М. В.*** Тенденции развития силовой электроники // Электроника: НТБ. 2019. № 8 (189). С. 50–55. https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.189.8.50.55. – EDN: VBQZIN.

2. A review on the GaN-on-Si power electronic devices / ***Y. Zhong, J. Zhang, S. Wu et al.*** // Fundamental Research. 2022. Vol. 2. Iss. 3. P. 462–475. https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.11.028

3. ***Stork J. M. C., Hosey G. P.*** SOI technology for power management in automotive and industrial applications // Solid-State Electronics. 2017. Vol. 128. P. 3–9. https://doi.org/10.1016/j.sse.2016.10.033

4. Ultra-stable epitaxial polysilicon resonators / ***E. J. Ng, S. Wang, D. Buchman et al.*** // 2012 Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop. Hilton Head, SC: Transducer Research Foundation, 2012. P. 271–274. http://doi.org/10.31438/trf.hh2012.73

5. ***Suzuki T., Mimura A., Kamei T., Ogawa T.*** Deformation in dielectric-isolated substrates and its control by a multilayer polysilicon support structure // J. Electrochem. Soc. 1980. Vol. 127. No. 7. P. 1537–1541. https://doi.org/10.1149/1.2129945

6. Mechanical characterization of thick polysilicon films: Young's modulus and fracture strength evaluated with microstructures / ***S. Greek, F. Ericson, S. Johansson et al.*** // J. Micromech. Microeng. 1999. Vol. 9. No. 3. P. 245–251. https://doi.org/10.1088/0960-1317/9/3/305

7. Пат. 2393585 РФ. Способ формирования полупроводниковых структур / ***А. Ф. Волков, В. В. Козихин, Е. М. Соколов и др.***; заявл. 28.04.2009; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. 9 с. EDN: POMSHH.

8. ***Wang T. H., Ciszek T. F.*** Growth of large-grain silicon layers by atmospheric iodine vapor transport // J. Electrochem. Soc. 2000. Vol. 147. No. 5. P. 1945–1949. https://doi.org/10.1149/1.1393463

9. Material properties of polysilicon layers deposited by atmospheric pressure iodine vapor transport / ***T. H. Wang, T. F. Ciszek, M. Page et al.*** // Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000 (Cat. No. 00CH37036). Anchorage: IEEE, 2000. P. 138–141. https://doi.org/10.1109/PVSC.2000.915773

10. APIVT-grown silicon thin layers and PV devices / ***T. H. Wang, T. F. Ciszek, M. R. Page et al.*** // Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002. New Orleans, LA: IEEE, 2002. P. 94–97. https://doi.org/10.1109/PVSC.2002.1190464

11. Газотранспортный хлоридный перенос кремния в сэндвич-системе / ***Ю. Н. Баранов, К.-Г. М. Шварц, Е. М. Соколов и др.*** // Наноиндустрия. 2018. № S (82). С. 273–280. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.82.273.280. – EDN: XQVMQP.

12. ***Suzuki T., Mimura A., Ogawa T.*** The deformation of polycrystalline-silicon deposited on oxide-covered single crystal silicon substrates // J. Electrochem. Soc. 1977. Vol. 124. No. 11. P. 1776–1780. https://doi.org/10.1149/1.2133155

13. ***Kamins T. I.*** Deformation occurring during the deposition of polycrystalline-silicon films // J. Electrochem. Soc. 1974. Vol. 121. No. 5. P. 681–684. https://doi.org/10.1149/1.2401887

14. ***Chen L., Miao J., Guo L., Lin R.*** Control of stress in highly doped polysilicon multi-layer diaphragm structure // Surf. Coat. Technol. 2001. Vol. 141. Iss. 1. P. 96–102. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01163-X

15. Управление прогибом структур кремния в технологии хлоридных газотранспортных реакций / ***Д. В. Тарасов, Ю. Н. Баранов, С. Д. Федотов и др.*** // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № S8-1 (113). С. 118–123. http://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.118.123. – EDN: MGWFLB.

16. ***Freund L. B., Suresh S.*** Thin film materials: Stress, defect formation and surface evolution. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 750 p. http://doi.org/10.1017/CBO9780511754715

17. ***Добрынин А. В.*** О применимости формулы Стони для расчета механических напряжений в толстых пленках и покрытиях // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 18. С. 32–36. EDN: RYNGVN.

Статья поступила в редакцию 01.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.05.2024 г.;
принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Тарасов Дмитрий Вадимович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-исследователь АО «Эпиэл» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2), tarasov@epiel.ru

Соколов Евгений Макарович – заместитель главного конструктора, начальник специального конструкторско-технологического бюро АО «Эпиэл» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2), sokolov@epiel.ru

Гаврилов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, и. о. ректора Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pcfme@miee.ru

References

1. Makushin M. Power electronics trends. *Elektronika: NTB = Electronics: STB*, 2019, no. 8 (189), pp. 50–55. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.189.8.50.55. – EDN: VBQZIN.

2. Zhong Y., Zhang J., Wu S., Jia L., Yang X., Liu Y., Zhang Y., Sun Q. A review on the GaN-on-Si power electronic devices. *Fundamental Research*, 2022, vol. 2, iss. 3, pp. 462–475. https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.11.028

3. Stork J. M. C., Hosey G. P. SOI technology for power management in automotive and industrial applications. *Solid-State Electronics*, 2017, vol. 128, pp. 3–9. https://doi.org/10.1016/j.sse.2016.10.033

4. Ng E. J., Wang S., Buchman D., Chiang C.-F., Kenny T. W., Muenzel H. D., Fuertsch M., Marek J. et al. Ultra-stable epitaxial polysilicon resonators. *2012 Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop.* Hilton Head, SC, Transducer Research Foundation, 2012, pp. 271–274. http://doi.org/10.31438/trf.hh2012.73

5. Suzuki T., Mimura A., Kamei T., Ogawa T. Deformation in dielectric-isolated substrates and its control by a multilayer polysilicon support structure. *J. Electrochem. Soc.*, 1980, vol. 127, no. 7, pp. 1537–1541. https://doi.org/10.1149/1.2129945

6. Greek S., Ericson F., Johansson S., Fürtsch M., Rump A. Mechanical characterization of thick polysilicon films: Young's modulus and fracture strength evaluated with microstructures. *J. Micromech. Microeng.*, 1999, vol. 9, no. 3, pp. 245–251. https://doi.org/10.1088/0960-1317/9/3/305

7. Volkov A. F., Kozikhin V. V., Sokolov E. M., Statsenko V. N., Stepchenkov V. N., Shvarts K.-G. M. *Method of semiconductor structure formation.* Patent 2393585 RF, publ. 27.06.2010, Bul. no. 18. 9 p. (In Russian). EDN: POMSHH.

8. Wang T. H., Ciszek T. F. Growth of large-grain silicon layers by atmospheric iodine vapor transport. *J. Electrochem. Soc.*, 2000, vol. 147, no. 5, pp. 1945–1949. https://doi.org/10.1149/1.1393463

9. Wang T. H., Ciszek T. F., Page M., Yan Y., Bauer R., Wang Q., Casey J., Reedy R. et al. Material properties of polysilicon layers deposited by atmospheric pressure iodine vapor transport. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000 (Cat. No. 00CH37036).* Anchorage, IEEE, 2000, pp. 138–141. https://doi.org/10.1109/PVSC.2000.915773

10. Wang T. H., Ciszek T. F., Page M. R., Bauer R. E., Wang Q., Landry M. D. APIVT-grown silicon thin layers and PV devices. *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002*. New Orleans, LA, IEEE, 2002, pp. 94–97. https://doi.org/10.1109/PVSC.2002.1190464

11. Baranov Yu. N., Schwartz K.-H. M., Sokolov E. M., Statsenko V. M., Fedotov S., Tarasov D. V., Timoshenkov S. P. Atmospheric pressure chloride transport in epitaxial system. *Nanoindustry Russia*, 2018, no. 9, pp. 273–280. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.82.273.280

12. Suzuki T., Mimura A., Ogawa T. The deformation of polycrystalline-silicon deposited on oxide-covered single crystal silicon substrates. *J. Electrochem. Soc.*, 1977, vol. 124, no. 11, pp. 1776–1780. https://doi.org/10.1149/1.2133155

13. Kamins T. I. Deformation occurring during the deposition of polycrystalline-silicon films. *J. Electrochem. Soc.*, 1974, vol. 121, no. 5, pp. 681–684. https://doi.org/10.1149/1.2401887

14. Chen L., Miao J., Guo L., Lin R. Control of stress in highly doped polysilicon multi-layer diaphragm structure. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 141, iss. 1, pp. 96–102. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01163-X

15. Tarasov D., Baranov Yu., Fedotov S., Sokolov E., Statsenko V., Gavrilov S. Control of silicon wafer bow in chloride vapor transport technology. *Nanoindustriya = Nanoindustry Russia*, 2022, vol. 15, no. S8-1 (113), pp. 118–123. http://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.118.123. – EDN: MGWFLB.

16. Freund L. B., Suresh S. *Thin film materials: Stress, defect formation and surface evolution.* Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2004, 750 p. http://doi.org/10.1017/CBO9780511754715

17. Dobrynin A. V. On the applicability of Stoney's formula for calculating the mechanical stresses in thick films and coatings. *Tech. Phys. Lett.*, 1997, vol. 23, pp. 709–710. https://doi.org/10.1134/1.1261664

The article was submitted 01.02.2024; approved after reviewing 03.05.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Dmitry V. Tarasov – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Research Engineer, Epiel JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Academician Valiev st., 6, bld. 2), tarasov@epiel.ru

Evgeniy M. Sokolov – Deputy Chief Designer, Head of the Special Design and Technological Bureau, Epiel JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Academician Valiev st., 6, bld. 2), sokolov@epiel.ru

Sergey A. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Acting Rector, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pcfme@miee.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 621.382.323
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-724-735
EDN: FYGKWS

Атомно-слоевое осаждение оксида тантала для сенсоров на основе полевого эффекта

В. П. Грудцов[1], Е. М. Еганова[2], О. В. Губанова[1], А. В. Горячев[2], К. В. Пучнин[1], Д. В. Рязанцев[1], А. Е. Кузнецов[2], Н. В. Комарова[1]

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

V.Grudtsov@tcen.ru

Аннотация. Оксид тантала – перспективный материал, используемый в электронике, в частности, для производства биосенсоров на основе полевого эффекта. Такие биосенсоры имеют высокую чувствительность к изменению поверхностного потенциала и химическую стойкость в водных растворах. Кроме того, на основе оксида тантала возможно создание высокочувствительных pH-сенсоров. В работе исследован процесс получения пленки оксида тантала методом термического атомно-слоевого осаждения с использованием воды и прекурсора PDMAT для применения при производстве перспективных биосенсорных устройств на основе полевых структур. Подобраны оптимальные параметры процесса и изучена его воспроизводимость. Исследованы равномерность, однородность и элементный состав получаемой пленки. Изготовленные с использованием данного оксида тантала структуры на основе ионно-чувствительных полевых транзисторов показывают близкую к предельной pH-зависимость (56 мВ/pH) и стабильность в буферных растворах.

Ключевые слова: оксид тантала, атомно-слоевое осаждение, ISFET-транзистор

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 21-79-10175, https://rscf.ru/project/21-79-10175/).

Для цитирования: Атомно-слоевое осаждение оксида тантала для сенсоров на основе полевого эффекта / В. П. Грудцов, Е. М. Еганова, О. В. Губанова и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 724–735. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-724-735. – EDN: FYGKWS.

© В. П. Грудцов, Е. М. Еганова, О. В. Губанова, А. В. Горячев, К. В. Пучнин, Д. В. Рязанцев, А. Е. Кузнецов, Н. В. Комарова, 2024

Original article

Atomic layer deposition of tantalum oxide for field effect sensors

V. P. Grudtsov[1], E. M. Eganova[2], O. V. Gubanova[1], A. V. Goryachev[2], K. V. Puchnin[1], D. V. Ryazantsev[1], A. E. Kuznetsov[2], N. V. Komarova[1]

[1]SMC "Technological Centre", Moscow, Russia
[2]Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

V.Grudtsov@tcen.ru

Abstract. Tantalum oxide is a promising material used in electronics, in particular for the production of biosensors based on the field effect. Such biosensors have high sensitivity to changes in surface potential and chemical stability in aqueous solutions. In addition, it is possible to create highly sensitive pH sensors based on tantalum oxide. In this work, the process of obtaining a tantalum oxide film by thermal atomic layer deposition using water and a PDMAT precursor, for use in manufacturing of promising field effect biosensor structures, is studied. Optimal process parameters have been selected and its reproducibility has been studied. The uniformity, homogeneity and elemental composition of the resulting film were studied. Structures based on ion-sensitive field-effect transistors (ISFETs) made using this tantalum oxide show pH dependence close to the limit (56 mV/pH) and stability in buffer solutions.

Keywords: tantalum oxide, atomic layer deposition, ISFET

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-79-10175, https://rscf.ru/en/project/21-79-10175/).

For citation: Grudtsov V. P., Eganova E. M., Gubanova O. V., Goryachev A. V., Puchnin K. V., Ryazantsev D. V., Kuznetsov A. E., Komarova N. V. Atomic layer deposition of tantalum oxide for field effect sensors. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 724–735. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-724-735. – EDN: FYGKWS.

Введение. Тонкие слои оксида тантала Ta_2O_5 применяются в качестве антиотражающего материала оптических систем [1], при производстве энергонезависимой памяти [2], а также как материал с высокой диэлектрической проницаемостью при изготовлении наноразмерных структур [3]. В частности, оксид тантала может быть использован в качестве материала чувствительной поверхности биосенсоров на основе полевого эффекта, в том числе ионно-чувствительного полевого транзистора (ISFET), ввиду высокой диэлектрической проницаемости, что улучшает чувствительность прибора к изменению поверхностного потенциала и повышает химическую стойкость в водных растворах [4]. Кроме того, на основе оксида тантала возможно создание pH-сенсоров с чувствительностью, близкой к максимально возможной [5]. Такие сенсоры на основе ISFET-транзистора с Ta_2O_5-поверхностью показывают лучшую pH-чувствительность и стабильность по сравнению с сенсорами на основе Si_3N_4 или Al_2O_3, а также чувствительность, сравнимую с сенсорами на основе HfO_2 и ZrO_2 [4].

Тонкая пленка Ta_2O_5 может быть создана такими методами, как химическое (Chemical Vapor Deposition, CVD) и физическое (Physical Vapor Deposition, PVD) осаждение из газовой фазы [6]. Однако для получения высококачественных наноразмерных пленок, как правило, используется метод атомно-слоевого осаждения (Atomic Layer Deposition, ALD). Слои, выращенные ALD-методом, характеризуются высокой равномерностью и степенью контроля толщины пленки и могут быть получены при относительно низкой температуре [7].

Свойства пленок, получаемых ALD-методом, зависят от параметров выбранного процесса и используемых реактивов. Для осаждения слоев на основе тантала используются различные прекурсоры, включая галогениды [8, 9], этоксид [8, 10] и алкиламиды [11, 12]. Прекурсоры из последней группы, например пентакис(диметиламино)тантал (PDMAT), не содержат атомов хлора, что позволяет избежать коррозии металлизации на позднем этапе производства (Back End of Line, BEOL) и проводить осаждение при более низких температурах. Кроме того, при их использовании возможно проведение как плазменного процесса с участием кислородной плазмы, так и термического процесса с водой в качестве источника атомов кислорода [12].

В настоящей работе изучаются пленки Ta_2O_5, полученные на основе прекурсора PDMAT методом атомно-слоевого осаждения, для изготовления ISFET-биосенсоров с плавающим затвором. Исследуются пленки как на чистой кремниевой поверхности, так и выращенные на поверхности алюминиевых площадок согласно маршруту производства биосенсора на основе ISFET-транзистора. Рассматриваются также свойства полученных пленок в составе изготовленных биосенсоров.

Методы исследования. Атомно-слоевое осаждение осуществляли на установке Fiji G2, Veeco (НПК «Технологический центр», г. Москва). Пересыпку порошкообразного прекурсора в герметичные контейнеры, подсоединяемые к установке атомно-слоевого осаждения, проводили в инертной атмосфере в азотном шкафу.

Для создания пленки Ta_2O_5 применяли термический процесс с использованием прекурсора PDMAT (ООО «ДАлХИМ», г. Нижний Новгород) и деионизованной воды в качестве реагентов. Процесс отрабатывали на кремниевых подложках *p*-типа с ориентацией <100> диаметром 100 мм. Полученные пленки исследовали методами эллипсометрии (Senduro, SENTECH Instruments GmbH), оже-спектроскопии (Jamp-9510F, Jeol), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (JEM-2100 plus, Jeol), атомно-силовой микроскопии (АСМ) (ICON Dimension, Bruker). Электрические параметры структур измеряли с применением полупроводникового анализатора (B1500A, Agilent) и зондовой станции (PM5, Cascade).

Диэлектрическую проницаемость определяли путем создания на образцах с нанесенной оксидной поверхностью конденсаторных структур и измерения высокочастотных C–V-характеристик аналогично методике, описанной в работе [13]. В качестве нижней обкладки конденсатора применяли кремниевую сильнолегированную подложку с низкой удельной проводимостью, в качестве верхней обкладки – капли жидкого галлия. При изучении диэлектрической проницаемости использовали пластины КЭМ ориентации <100> с проводимостью не более 0,005 Ом·см с нанесенной по стандартному рецепту пленкой оксида тантала. C–V-характеристики измеряли в режиме Cp–Rp на частоте 100 кГц. Площадь капель галлия определяли после измерений с помощью микроскопа Axio Imager 2 (Zeiss, Германия) (функция Contour). Диэлектрическую проницаемость ε Ta_2O_5 рассчитывали исходя из наличия естественного оксида кремния SiO_2 толщиной 3 нм с ε = 3,9.

Для оценки возможности использования разработанного процесса с целью формирования ISFET-транзистора с плавающим затвором осаждали Ta_2O_5 на вскрытые алюминиевые контактные площадки.

Для построения pH-зависимости снимали проходные (I_D–U_G) ВАХ при использовании в качестве затворного электролита растворов с различным значением pH, после чего регистрировали напряжение, соответствующее фиксированному току (I_D = 1 мкА) в допороговой области. Напряжение между стоком и истоком U_{DS} = 0,1 В, напряжение на подложке U_b = 0. Для pH = 2,2…3 использовали 0,1 М буфера глицин-HCl, для pH = 3,6…6,6 – 0,1 М цитрат-фосфатного буфера, для pH = 7,2…8 – 0,1 М HEPES, для pH = 8,5…10,5 – 0,1 М глицин-NaOH.

Результаты и их обсуждение. ***Осаждение пленки оксида тантала.*** Основными критериями при постановке ALD-процесса являются разброс толщины осаждаемого слоя от пластины к пластине, неравномерность слоя по пластине и скорость роста пленки. Данные параметры можно оценить путем набора статистики по толщине пленки для нескольких итераций процесса осаждения. Скорость роста пленки зависит от многих параметров, включая используемые реагенты, температуру, конструкцию установки атомно-слоевого осаждения и время подачи реагентов. Температура реактора ограничена 250 °C, так как при более высоких температурах возможно разложение прекурсора PDMAT [12]. Емкость с прекурсором подогревали до температуры 105 °C. В качестве газа-переносчика использовали аргон. Длительность пульса воды зафиксирована на 0,1 с. Для оптимизации скорости роста при данных параметрах осуществляли варьирование длительности пульса подачи PDMAT в реакционную камеру. Результаты эллипсометрии показали, что для пленок, выращенных на кремниевой подложке, скорость роста увеличивается при увеличении длины пульса до 0,5 с. По достижении данного значения, несмотря на увеличение расхода PDMAT, скорость роста входит в насыщение (рис. 1). В оптимизированных по длине пульса PDMAT-условиях средняя скорость роста слоя составила 0,59 Å/цикл, что превышает скорости роста, полученные для прекурсоров на основе этоксида и хлорида [8], но уступает процессу термического атомно-слоевого осаждения с прекурсором PDMAT (0,8 Å/цикл) [14].

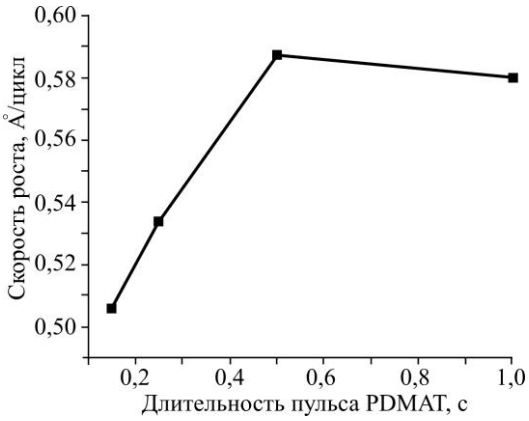


Рис. 1. Зависимость скорости роста слоя Ta_2O_5 от длительности пульса PDMAT (длительность пульса воды 0,1 с, температура в реакторе 250 °C, камера продувалась в течение 5 с)

Fig. 1. Dependence of the growth rate of the Ta_2O_5 layer on the duration of the PDMAT pulse (the duration of the water pulse is 0.1 s, the temperature in the reactor is 250 °C, the chamber is purged for 5 s)

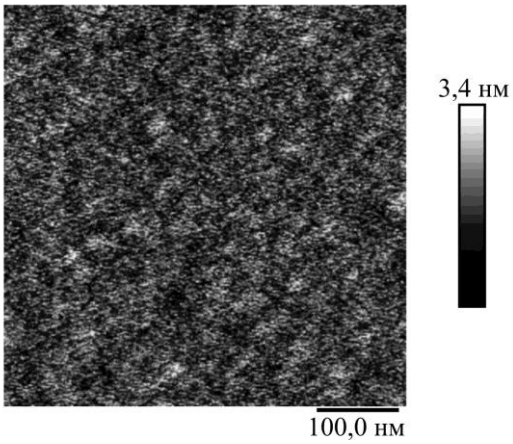


Рис. 2. АСМ-карта области размером 0,5 × 0,5 мкм для образца с поверхностью Ta_2O_5 на кремнии

Fig. 2. AFM map of a 0.5×0.5 μm region for a sample with a Ta_2O_5 surface on silicon

Для процесса из 500 циклов средняя толщина пленки Ta_2O_5 составила 297,5 Å с разбросом ±4,5 Å между 100-мм пластинами и средней неравномерностью по пластине ±2 Å, что свидетельствует о воспроизводимости процесса и равномерности осажденного слоя. Типичное АСМ-изображение пленки области размером 0,5 × 0,5 мкм приведено на рис. 2, соответствующий профиль показан на рис. 3.

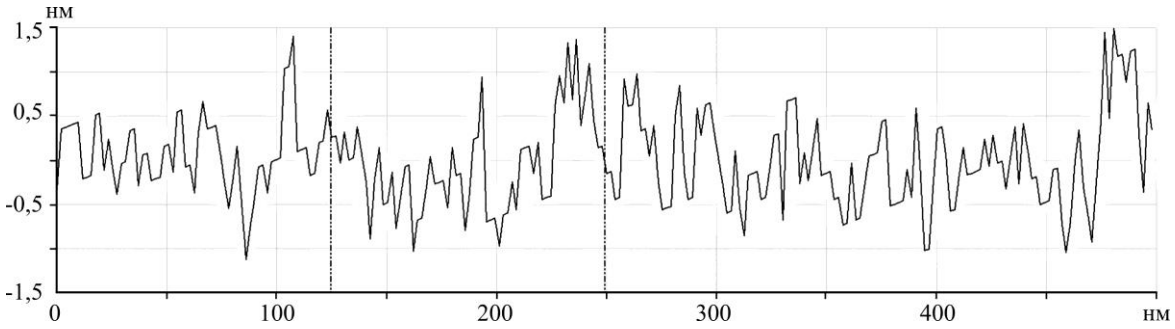


Рис. 3. АСМ-профиль образца с поверхностью Ta_2O_5 на кремнии
Fig. 3. AFM profile of a sample with a Ta_2O_5 surface on silicon

Согласно АСМ-исследованиям, сформированная пленка однородная (среднее квадратичное отклонение из абсолютных значений отклонения профиля R_q = 0,239 нм) и не содержит крупных зерен. Эти зерна являются источниками дефектов и могут играть роль зарядовых центров, что приводит к гистерезису и нестабильности порогового напряжения при использовании дефектных пленок в качестве чувствительной поверхности ISFET-транзистора. Результаты измерений диэлектрической проницаемости приведены в таблице.

Значения диэлектрической проницаемости пленки Ta_2O_5 в зависимости от площади конденсаторной структуры
Measurements of the dielectric constant of Ta_2O_5 depending on capacitor structure surface

Структура	Площадь *S*, мкм^2	Диэлектрическая проницаемость ε
1	12 892	12,3
2	116 174	10,2
3	102 523	10,5
4	8914	17,3
5	18 964	12,2
6	62 875	11,5
7	13 384	15,6
8	53 719	11,5
9	47 038	24,0

Итоговое среднее значение диэлектрической проницаемости сформированной пленки составило ε = 13,9 ± 3,4. Согласно литературным данным, значение диэлектрической проницаемости Ta_2O_5 зависит от процесса создания пленки и может варьироваться в пределах 22–28 для аморфных слоев и быть значительно выше (вплоть до 60) для кристаллического Ta_2O_5 [15]. Таким образом, полученные значения диэлектрической проницаемости значительно меньше ожидаемых, однако методика измерений содержит несколько источников возможных ошибок. Во-первых, из-за слабой смачиваемости поверхности образца галлием капля металла образует угол более 90° с поверх-

ностью образца и реальная площадь контакта оказывается менее видимой в микроскоп, что приводит к занижению рассчитываемого значения диэлектрической проницаемости. Во-вторых, из-за тонкого подслоя естественного SiO_2 измеряемая емкость включает в себя две соизмеримые емкости $C_{Ta_2O_5}$ и C_{SiO_2}, что не позволяет точно определить емкость Ta_2O_5 по сравнению со случаем более тонкого слоя SiO_2 или его отсутствия. Для получения более точного значения диэлектрической проницаемости эксперимент может быть повторен с увеличением толщины Ta_2O_5 и предварительным травлением слоя естественного SiO_2 для его максимального уменьшения либо с использованием специально изготовленных конденсаторных структур с контролируемой площадью.

Элементный состав пленки Ta_2O_5, полученной на кремниевой подложке, изучен методами оже-спектроскопии. Для исследования на оже-спектрометре подготовлен образец с предварительной обработкой поверхности в HF для удаления естественного оксида. Результаты исследования, подтверждающие наличие пленки Ta_2O_5 на поверхности образцов, представлены на рис. 4. Пленка сильнее окислена в приповерхностном слое и равномерна в объеме. Наличие переходного слоя на границе раздела пленка – подложка обусловлено как взаимной диффузией атомов пленки и подложки, так и особенностями анализа и ионного распыления образцов (глубина выхода оже-электронов, перемешанный слой, шероховатость, неоднородность толщины пленки и др.).

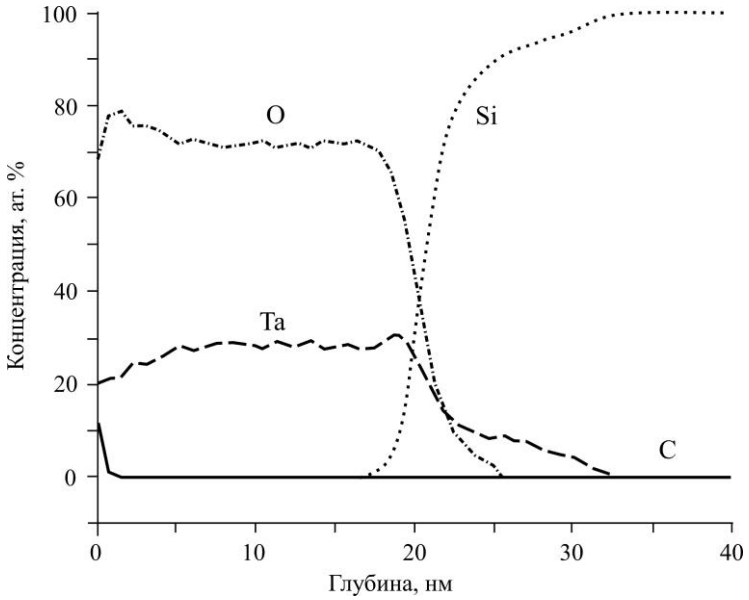


Рис. 4. Зависимость атомной концентрации от глубины (расстояния от поверхности) на образце Ta_2O_5/Si. Толщина оксида Ta_2O_5 тантала 20 нм
Fig. 4. Dependence of atomic concentration on depth (distance from surface) on a Ta_2O_5/Si sample. Ta_2O_5 thickness is 20 nm

Результаты исследования пленок показали, что термический процесс атомно-слоевого осаждения на основе прекурсора PDMAT позволяет получить равномерные сплошные пленки Ta_2O_5 на подложках Si и SiO_2 со средней скоростью роста 0,59 Å/цикл.

Применение пленки Ta_2O_5 в качестве чувствительной поверхности ISFET-транзистора с плавающим затвором. Для исследования возможности использования пленки, полученной ALD-методом, в структуре ISFET-транзистора разработанный процесс интегрирован в технологический маршрут изготовления ISFET-транзистора

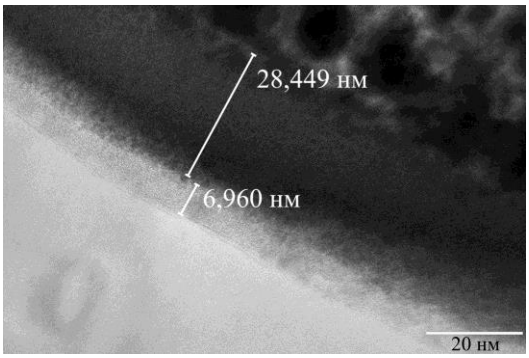


Рис. 5. ПЭМ-изображение образца с пленкой Ta_2O_5 на алюминии, полученное в просвечивающем электронном микроскопе
Fig. 5. TEM image of a sample with a Ta_2O_5 film on aluminum

с плавающим затвором. Для этого перед осаждением Ta_2O_5 на алюминиевые контактные площадки подготавливали поверхности путем зачистки (Ar, 160 °C, 5 мин) с последующим окислением (O_2, 160 °C, 10 мин). ПЭМ-изображение (рис. 5) позволило установить, что в результате описанного цикла на поверхности алюминия сформирована пленка оксида алюминия Al_2O_3 толщиной ~ 7 нм, на которой располагается аморфная пленка оксида тантала. С точки зрения конструкции ISFET-транзистора аморфные пленки предпочтительнее для использования в качестве чувствительной поверхности биосенсора из-за большего числа поверхностных связей [16]. Кроме того, из-за анизотропии кристаллических пленок возможен разброс технологических параметров итогового устройства [17], что также делает оптимальным применение аморфного Ta_2O_5.

Исследование методом оже-спектроскопии (рис. 6) подтверждает состав пленки Ta_2O_5 на поверхности образца. Между пленкой и алюминием находится слой Al_2O_3. Как и в случае осаждения на кремниевую поверхность, пленка сильнее окислена в приповерхностном слое и равномерна в объеме, также наблюдается диффузия атомов тантала в нижележащий слой Al_2O_3.

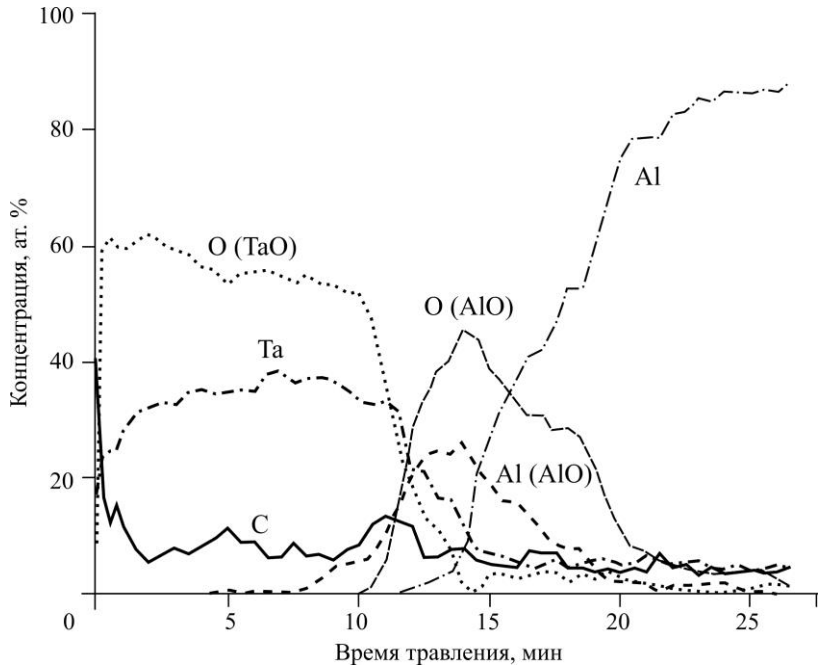


Рис. 6. Зависимость атомной концентрации от времени травления образца на площадке $Ta_2O_5/Al_2O_3/Al$ (из-за углеродного скотча, использованного для фиксации образца, присутствуют атомы углерода)
Fig. 6. Dependence of atomic concentration on the etching time of the sample on the $Ta_2O_5/Al_2O_3/Al$ area (carbon atoms are present due to the carbon adhesive tape used to fix the sample)

Для ISFET-транзистора с W/L = 500/4 мкм и площадью чувствительной поверхности 100 × 100 мкм исследовали pH-чувствительность путем регистрации напряжения, соответствующего фиксированному току в допороговой области (I_D = 1 мкА), при различных pH (рис. 7). Зависимость является линейной в диапазоне pH = 2,2…10,2 с наклоном 56 мВ/pH, что близко к теоретическому максимуму [5] и хорошо согласуется с литературными данными [18]. Для таких ISFET-транзисторов также характерно малое значение гистерезиса (менее 5 мВ) и дрейфа тока (~ $5 \cdot 10^{-11}$ А/мин) при постоянном напряжении на затворе и использовании хлорсеребряного электрода сравнения, что позволяет говорить о стабильности ISFET-транзистора с чувствительной поверхностью на основе оксида тантала.

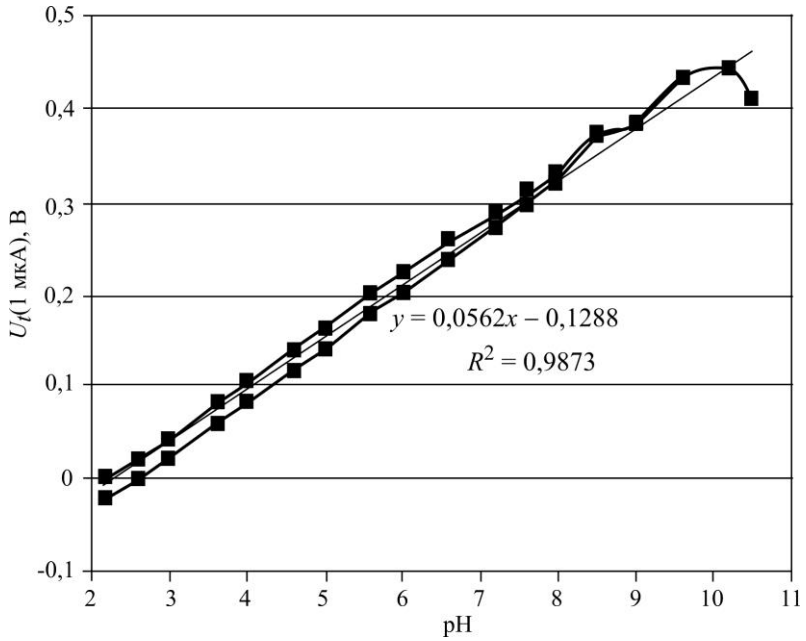


Рис. 7. Зависимость pH-чувствительности от напряжения для ISFET-транзистора (W/L = 500/4) с вынесенным плавающим затвором и Ta_2O_5 в качестве чувствительной поверхности

Fig. 7. pH sensitivity dependence on voltage for ISFET (W/L = 500/4) with a remote floating gate and Ta_2O_5 as a sensitive surface (surface area 100×100 μm)

Заключение. Разработанный процесс изготовления пленки Ta_2O_5 ALD-методом позволяет получать равномерную и воспроизводимую пленку, не содержащую дефектов, приводящих к негативным эффектам при изготовлении биосенсорных структур. Изготовленные с использованием Ta_2O_5 структуры на основе ISFET-транзисторов показывают близкую к предельной pH-зависимость и стабильность в буферных растворах.

Таким образом, ALD-метод получения пленки Ta_2O_5 может быть использован в технологии производства ISFET-транзисторов с плавающим затвором.

Литература

1. ***Pfeiffer K., Schulz U., Tünnermann A., Szeghalmi A.*** Antireflection coatings for strongly curved glass lenses by atomic layer deposition // Coatings. 2017. Vol. 7. Iss. 8. Art. No. 118. https://doi.org/10.3390/coatings7080118

2. ***Ryu J.-H., Kim S.*** Improved intrinsic nonlinear characteristics of Ta_2O_5/Al_2O_3-based resistive random-access memory for high-density memory applications // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 18. Art. No. 4201. https://doi.org/10.3390/ma13184201

3. Miniaturized pH-sensitive field-effect capacitors with ultrathin Ta_2O_5 films prepared by atomic layer deposition / ***D. Molinnus, H. Iken, A. L. Johnen et al.*** // Phys. Status Solidi A. 2022. Vol. 219. Iss. 8. Art. ID: 2100660. https://doi.org/10.1002/pssa.202100660

4. ***Dinar A. M., Mohd Zain A. S., Salehuddin F.*** Comprehensive identification of sensitive and stable ISFET sensing layer high-k gate based on ISFET/electrolyte models // Int. J. Electr. Comput. Eng. (IJECE). 2019. Vol. 9. No. 2. P. 926–933. http://doi.org/10.11591/ijece.v9i2.pp926-933

5. ***Matsuo T., Esashi M.*** Methods of ISFET fabrication // Sensors and Actuators. 1981. Vol. 1. P. 77–96. https://doi.org/10.1016/0250-6874(81)80006-6

6. ***Gurylev V.*** A review on the development and advancement of Ta_2O_5 as a promising photocatalyst // Mater. Today Sustainability. 2022. Vol. 18. Art. No. 100131. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100131

7. ***Oke J. A., Jen T.-C.*** Atomic layer deposition and other thin film deposition techniques: From principles to film properties // J. Mater. Res. Technol. 2022. Vol. 21. P. 2481–2514. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.064

8. ***Kukli K., Ritala M., Leskelä M.*** Atomic layer deposition and chemical vapor deposition of tantalum oxide by successive and simultaneous pulsing of tantalum ethoxide and tantalum chloride // Chem. Mater. 2000. Vol. 12. Iss. 7. P. 1914–1920. https://doi.org/10.1021/cm001017j

9. ***Sundqvist J., Högberg H., Hårsta A.*** Atomic layer deposition of Ta_2O_5 using the TaI_5 and O_2 precursor combination // Chem. Vap. Deposition. 2003. Vol. 9. Iss. 5. P. 245–248. https://doi.org/10.1002/cvde.200306243

10. ***Yota J.*** Characterization of ALD Ta_2O_5, Al_2O_3, and Ta_2O_5/Al_2O_3 nanolaminate as metal-insulator-metal capacitor dielectric for GaAs HBT technology // ECS Trans. 2022. Vol. 109. No. 5. P. 27–38. https://doi.org/10.1149/10905.0027ecst

11. Outstanding memory characteristics with atomic layer deposited $Ta_2O_5/Al_2O_3/TiO_2/Al_2O_3/Ta_2O_5$ nanocomposite structures as the charge trapping layer / ***P. Han, T.-C. Lai, M. Wang et al.*** // Appl. Surf. Sci. 2019. Vol. 467–468. P. 423–427. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.197

12. ***Maeng W. J., Park S.-J., Kim H.*** Atomic layer deposition of Ta-based thin films: Reactions of alkylamide precursor with various reactants // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. Vol. 24. Iss. 5. P. 2276–2281. https://doi.org/10.1116/1.2345205

13. Properties of amorphous and crystalline Ta_2O_5 thin films deposited on Si from a $Ta(OC_2H_5)_5$ precursor / ***C. Chaneliere, S. Four, J. L. Autran et al.*** // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. Iss. 9. P. 4823–4829. https://doi.org/10.1063/1.367277

14. ***Maeng W. J., Kim H.*** Thermal and plasma-enhanced ALD of Ta and Ti oxide thin films from alkylamide precursors // Electrochem. Solid-State Lett. 2006. Vol. 9. No. 6. P. G191–G194. https://doi.org/10.1149/1.2186427

15. ***Chaneliere C., Autran J. L., Devine R. A. B., Balland B.*** Tantalum pentoxide (Ta_2O_5) thin films for advanced dielectric applications // Mater. Sci. Eng., R. 1998. Vol. 22. Iss. 6. P. 269–322. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(97)00023-5

16. Surface profile gradient in amorphous Ta_2O_5 semi conductive layers regulates nanoscale electric current stability / ***A. C. Cefalas, Z. Kollia, N. Spyropoulos-Antonakakis et al.*** // Appl. Surf. Sci. 2017. Vol. 396. P. 1000–1019. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.076

17. ***Nakagawa Y., Okada T.*** Material constants of new piezoelectric Ta_2O_5 thin films // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68. Iss. 2. P. 556–559. https://doi.org/10.1063/1.346828

18. ***Van Hal R. E. G., Eijkel J. C. T., Bergveld P.*** A general model to describe the electrostatic potential at electrolyte oxide interfaces // Adv. Colloid Interface Sci. 1996. Vol. 69. Iss. 1–3. P. 31–62. https://doi.org/10.1016/S0001-8686(96)00307-7

Статья поступила в редакцию 22.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 09.04.2024 г.; принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Грудцов Виталий Павлович – инженер научно-исследовательской лаборатории интегральных биохимических наносенсоров НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), V.Grudtsov@tcen.ru

Еганова Елена Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела микро- и наноэлектроники и биосенсорики Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11), eganova.elena@gmail.com

Губанова Оксана Вадимовна – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных биохимических наносенсоров НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), o.chuyko@tcen.ru

Горячев Андрей Викторович – младший научный сотрудник отдела микро- и наноэлектроники и биосенсорики Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11), andrei.goryachev@mail.ru

Пучнин Кирилл Владимирович – кандидат химических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных биохимических наносенсоров НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), puchninkv@yandex.ru

Рязанцев Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных биохимических наносенсоров НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), 79629202882@ya.ru

Кузнецов Александр Евгеньевич – доктор технических наук, начальник отдела микро- и наноэлектроники и биосенсорики Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11), kuznetsov.a@inme-ras.ru

Комарова Наталья Владимировна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных биохимических наносенсоров НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), nat.v.kom@gmail.com

References

1. Pfeiffer K., Schulz U., Tünnermann A., Szeghalmi A. Antireflection coatings for strongly curved glass lenses by atomic layer deposition. *Coatings,* 2017, vol. 7, iss. 8, art. no. 118. https://doi.org/10.3390/coatings7080118

2. Ryu J.-H., Kim S. Improved intrinsic nonlinear characteristics of Ta_2O_5/Al_2O_3-based resistive random-access memory for high-density memory applications. *Materials,* 2020, vol. 13, iss. 18, art. no. 4201. https://doi.org/10.3390/ma13184201

3. Molinnus D., Iken H., Johnen A. L., Richstein B., Hellmich L., Poghossian A., Knoch J., Schöning M. J. Miniaturized pH-sensitive field-effect capacitors with ultrathin Ta_2O_5 films prepared by atomic layer deposition. *Phys. Status Solidi A,* 2022, vol. 219, iss. 8, art. ID: 2100660. https://doi.org/10.1002/pssa.202100660

4. Dinar A. M., Mohd Zain A. S., Salehuddin F. Comprehensive identification of sensitive and stable ISFET sensing layer high-k gate based on ISFET/electrolyte models. *Int. J. Electr. Comput. Eng. (IJECE),* 2019, vol. 9, no. 2, pp. 926–933. http://doi.org/10.11591/ijece.v9i2.pp926-933

5. Matsuo T., Esashi M. Methods of ISFET fabrication. *Sensors and Actuators,* 1981, vol. 1, pp. 77–96. https://doi.org/10.1016/0250-6874(81)80006-6

6. Gurylev V. A review on the development and advancement of Ta_2O_5 as a promising photocatalyst. *Mater. Today Sustainability,* 2022, vol. 18, art. no. 100131. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100131

7. Oke J. A., Jen T.-C. Atomic layer deposition and other thin film deposition techniques: From principles to film properties. *J. Mater. Res. Technol.,* 2022, vol. 21, pp. 2481–2514. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.064

8. Kukli K., Ritala M., Leskelä M. Atomic layer deposition and chemical vapor deposition of tantalum oxide by successive and simultaneous pulsing of tantalum ethoxide and tantalum chloride. *Chem. Mater.*, 2000, vol. 12, iss. 7, pp. 1914–1920. https://doi.org/10.1021/cm001017j

9. Sundqvist J., Högberg H., Hårsta A. Atomic layer deposition of Ta_2O_5 using the TaI_5 and O_2 precursor combination. *Chem. Vap. Deposition*, 2003, vol. 9, iss. 5, pp. 245–248. https://doi.org/10.1002/cvde.200306243

10. Yota J. Characterization of ALD Ta_2O_5, Al_2O_3, and Ta_2O_5/Al_2O_3 nanolaminate as metal-insulator-metal capacitor dielectric for GaAs HBT technology. *ECS Trans.*, 2022, vol. 109, no. 5, pp. 27–38. https://doi.org/10.1149/10905.0027ecst

11. Han P., Lai T.-C., Wang M., Zhao X.-R., Cao Y.-Q., Wu D., Li A.-D. Outstanding memory characteristics with atomic layer deposited $Ta_2O_5/Al_2O_3/TiO_2/Al_2O_3/Ta_2O_5$ nanocomposite structures as the charge trapping layer. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, vol. 467–468, pp. 423–427. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.197

12. Maeng W. J., Park S.-J., Kim H. Atomic layer deposition of Ta-based thin films: Reactions of alkylamide precursor with various reactants. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2006, vol. 24, iss. 5, pp. 2276–2281. https://doi.org/10.1116/1.2345205

13. Chaneliere C., Four S., Autran J. L., Devine R. A. B., Sandler N. P. Properties of amorphous and crystalline Ta_2O_5 thin films deposited on Si from a $Ta(OC_2H_5)_5$ precursor. *J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 83, iss. 9, pp. 4823–4829. https://doi.org/10.1063/1.367277

14. Maeng W. J., Kim H. Thermal and plasma-enhanced ALD of Ta and Ti oxide thin films from alkylamide precursors. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2006, vol. 9, no. 6, pp. G191–G194. https://doi.org/10.1149/1.2186427

15. Chaneliere C., Autran J. L., Devine R. A. B., Balland B. Tantalum pentoxide (Ta_2O_5) thin films for advanced dielectric applications. *Mater. Sci. Eng., R*, 1998, vol. 22, iss. 6, pp. 269–322. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(97)00023-5

16. Cefalas A. C., Kollia Z., Spyropoulos-Antonakakis N., Gavriil V., Christofilos D., Kourouklis G., Semashko V. V. et al. Surface profile gradient in amorphous Ta_2O_5 semi conductive layers regulates nanoscale electric current stability. *Appl. Surf. Sci.*, 2017, vol. 396, pp. 1000–1019. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.076

17. Nakagawa Y., Okada T. Material constants of new piezoelectric Ta_2O_5 thin films. *J. Appl. Phys.*, 1990, vol. 68, iss. 2, pp. 556–559. https://doi.org/10.1063/1.346828

18. Van Hal R. E. G., Eijkel J. C. T., Bergveld P. A general model to describe the electrostatic potential at electrolyte oxide interfaces. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 1996, vol. 69, iss. 1–3, pp. 31–62. https://doi.org/10.1016/S0001-8686(96)00307-7

The article was submitted 22.03.2024; approved after reviewing 09.04.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Vitaly P. Grudtsov – Engineer of the Scientific Research Laboratory of Integrated Biochemical Nanosensors, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), V.Grudtsov@tcen.ru

Elena M. Eganova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Micro- and Nanoelectronics and Biosensory Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a, bld. 11), eganova.elena@gmail.com

Oksana V. Gubanova – Scientific Researcher of the Scientific Research Laboratory of Integrated Biochemical Nanosensors, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), o.chuyko@tcen.ru

Andrey V. Goryachev – Junior Scientific Researcher of the Micro- and Nanoelectronics and Biosensory Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a, bld. 11), andrei.goryachev@mail.ru

Kirill V. Puchnin – Cand. Sci. (Chem.), Scientific Researcher of the Scientific Research Laboratory of Integrated Biochemical Nanosensors, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), puchninkv@yandex.ru

Dmitry V. Ryazantsev – Junior Scientific Researcher of the Scientific Research Laboratory of Integrated Biochemical Nanosensors, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), 79629202882@ya.ru

Alexander E. Kuznetsov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Micro- and Nanoelectronics and Biosensory Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a, bld. 11), kuznetsov.a@inme-ras.ru

Natalya V. Komarova – Cand. Sci. (Chem.), Senior Scientific Researcher of the Scientific Research Laboratory of Integrated Biochemical Nanosensors, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), nat.v.kom@gmail.com

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

Научная статья
УДК 535.317:776
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-736-751
EDN: DVEATM

Моделирование дифракционных эффектов при использовании фазосдвигающих слоев в фотолитографии

И. В. Лавров[1], Д. А. Дронова[1], М. В. Силибин[1], А. В. Аникин[1], С. В. Дубков[1], Е. А. Лебедев[1], Р. А. Шарипов[1], Е. Н. Вигдорович[1], Д. Г. Громов[1,2]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия

demetpatakai@gmail.com

Аннотация. Производство современных изделий микро- и наноэлектроники основывается на технологии проекционной литографии, определяющей возможность формирования топологических элементов с нанометровыми размерами. Близкое расположение элементов на фотошаблоне приводит к негативным дифракционным эффектам, влияющим на качество и размер получаемых изображений. В работе проведено моделирование дифракционной картины, получающейся при прохождении глубокого ультрафиолетового излучения через фотошаблон с фазосдвигающими на 180° частично прозрачными полосами при различных геометрических параметрах шаблонной структуры и разной прозрачности полос. Расчет проведен на основе фурье-оптики. Рассмотрены одномерные регулярные шаблонные структуры с четным количеством прозрачных щелей бесконечной длины с фазосдвигающими полосами между ними. Падающая на фотошаблон электромагнитная волна считается плоской и линейно поляризованной. Рассмотрены случаи излучения с длиной волны 193, 248 и 365 нм. Исследован вид дифракционной картины и вычислена ее контрастность в зависимости от ширины полос и щелей, их отношения, коэффициента пропускания фазосдвигающих полос, количества щелей и полос. Показано, что применение фазосдвигающих полос существенно увеличивает контрастность в случаях, когда размеры элементов намного меньше длины волны падающего излучения. При этом получено, что отклонение сдвига фазы от идеального значения 180° на 15° в обе стороны незначительно влияет на контрастность дифракционной картины. Установлено, что при большом количестве элементов структуры в случае падающего излучения в виде плоской волны принципиальным ограничением снизу для пространственного периода структуры является длина волны излучения (без учета числовой апертуры фокусирующей системы). Продемонстрировано, что с помощью нарушения регулярности структуры – уменьшения ширины щелей в крайних частях структуры – можно улучшить однородность распределения контрастности дифракционной картины.

Ключевые слова: фотошаблон, дифракционная картина, фурье-оптика, контрастность, фазосдвигающая полоса, коэффициент пропускания

© И. В. Лавров, Д. А. Дронова, М. В. Силибин, А. В. Аникин, С. В. Дубков, Е. А. Лебедев, Р. А. Шарипов, Е. Н. Вигдорович, Д. Г. Громов, 2024

Финансирование работы: работа выполнена в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2023-0014).

Для цитирования: Моделирование дифракционных эффектов при использовании фазосдвигающих слоев в фотолитографии / И. В. Лавров, Д. А. Дронова, М. В. Силибин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 736–751. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-736-751. – EDN: DVEATM.

Original article

Simulation of the diffraction effects using phase-shifting layers in photolithography

I. V. Lavrov[1], D. A. Dronova[1], M. V. Silibin[1], A. V. Anikin[1], S. V. Dubkov[1], E. A. Lebedev[1], R. A. Sharipov[1], E. N. Vigdorovich[1], D. G. Gromov[1,2]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

demetpatakai@gmail.com

Abstract. Contemporary micro- and nanoelectronic production is based on projection lithography technology defining the possibility to form nanosized topological features. Close proximity of elements on photomask leads to negative diffraction effects affecting quality and size of resulting images. In this work, the simulation of diffraction pattern resulting from the passage of deep ultraviolet radiation through a photomask with 180° phase-shifting partially transparent lines for different geometric parameters of the mask structure and different transparency of the lines was performed. The calculation is based on Fourier optics. One-dimensional regular mask structures with an even number of transparent gaps of infinite length with phase-shifting material lines between them are considered. The electromagnetic wave incident on the photomask is assumed to be plane and linearly polarized. The cases of radiation with wavelength of 193, 248 and 365 nm are considered. The type of diffraction pattern is investigated and its contrast is calculated depending on the width of the lines and gaps, on their ratio, on the value of the transmission coefficient of the phase-shifting material lines, and on the number of gaps and lines. It was shown that the use of phase-shifting material lines significantly increases the contrast in cases where the dimensions of the elements are much smaller than the wavelength of the incident radiation. With that it was found that the phase shift deviation from the ideal value of 180° by 15° in both directions has little effect on the diffraction pattern contrast. It has been established that for a large number of structural elements in the case of incident radiation in the form of a plane wave, the fundamental lower limit for the spatial period of the structure is the radiation wavelength (without regard for the numerical aperture of the focusing system). It was demonstrated that by disrupting the regularity of the structure – decreasing the width of the gaps in the outer parts of the structure – it is possible to improve the uniformity of the diffraction pattern contrast distribution.

Keywords: photomask, diffraction pattern, Fourier optics, contrast, phase-shifting material lines, transmittance

Funding: the work was carried out under slate assignment (Agreement FSMR-2023-0014).

For citation: Lavrov I. V., Dronova D. A., Silibin M. V., Anikin A. V., Dubkov S. V., Lebedev E. A., Sharipov R. A., Gromov D. G., Vigdorovich E. N. Simulation of the diffraction effects using phase-shifting layers in photolithography. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 736–751. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-736-751. – EDN: DVEATM.

Введение. Фотолитография – сложный и трудоемкий процесс в производстве сверхбольших интегральных микросхем различного назначения, светодиодов высокой яркости, жестких дисков большого объема, датчиков, плоских дисплеев, МЭМС и др. [1, 2]. Производство современных изделий микро- и наноэлектроники основывается на технологии проекционной литографии, которая определяет возможность формирования топологических элементов с нанометровыми размерами [3]. Традиционно для реализации фотолитографии используются источники глубокого ультрафиолетового излучения: ртутная лампа с длиной волны 365 нм, эксимерные лазеры на KrF с длиной волны 248 нм и ArF с длиной волны 193 нм [4, 5]. Главная проблема получения интегральных элементов с нанометровыми размерами, много меньшими длины волны источника излучения, – дифракция [6, 7]. Малые размеры топографии фотошаблона, его тип и материал, а также состояние поляризации света оказывают воздействие на дифракционный спектр. Близкое расположение элементов на фотошаблоне приводит к негативным дифракционным эффектам, влияющим на качество и размер получаемых изображений. Для решения этой проблемы используются такие приемы, как коррекция рисунка фотошаблона, фазосдвигающие фотошаблоны, multi-patterning.

Применение «ослабляющих» фазосдвигающих фотошаблонов (Embedded Attenuated Phase Shift Mask, EAPSM), изготовленных из специального фазосдвигающего материала, частично пропускающего свет и сдвигающего фазу электромагнитного излучения, проходящего через него, на 180°, – один из способов минимизации дифракционных эффектов [8]. В качестве материалов для фазосдвигающих фотошаблонов используются CrO, CrON, MoSiO, MoSi, MoSiON [9–11]. Кроме того, имеются исследования по применению таких материалов, как SiN [12, 13], CF-FEEK [14], двухслойные маски Cr/SiON, Ta/SiO_2 [15].

Важными параметрами фазосдвигающих фотошаблонов являются их геометрия [15, 16], размер шага (количество полос) [17], тип и длина волны излучения [18], коэффициент пропускания материала [13, 19, 20]. Отметим, что к современным фотошаблонам предъявляются требования по радиационной стойкости, очистке, ремонту дефектов, технологичности [12, 21] и возможности многократного литографического травления (многократной обработки) [22]. Маски подобного рода выгодны не только с экономической стороны, но и с точки зрения повышения экологической безопасности.

В настоящей работе анализируется влияние факторов, определяющих эффективность использования фазосдвигающих слоев, при реализации фотолитографического процесса на длинах волн 193, 248 и 365 нм с целью изучения возможности получения минимальных топологических размеров элементов ИС.

Расчет. Пусть имеется плоский экран с шаблонной структурой в виде набора полос определенной ширины a бесконечной длины с промежутками между ними шириной b, на который нормально падает плоская монохроматическая волна длиной λ. Выберем систему координат xyz так, чтобы плоскость xy (или $z = 0$) совпадала с плоскостью экрана, а ось z направим вдоль распространения волны. Оси x и y в плоскости $z = 0$ целесообразно выбирать исходя из геометрических особенностей шаблонной структуры.

Пусть комплексная амплитуда падающей на экран волны в зависимости от точки *P(x,y,z)* пространства описывается функцией $U_i(x, y, z)$, а шаблонная структура имеет функцию пропускания $t(x, y)$, в общем случае комплекснозначную, в которой наряду с амплитудным коэффициентом пропускания учитывается сдвиг фазы волны при прохождении через точку экрана с координатами *x, y*. Тогда комплексная амплитуда прошедшей волны непосредственно за экраном имеет вид

$$U_t(x, y, 0) = U_i(x, y, 0)t(x, y).$$

Угловой спектр данной волны, определяемый как ее пространственный фурье-образ, можно записать в виде свертки в двумерном фурье-пространстве [23]:

$$A_t(f_x, f_y, 0) = A_i(f_x, f_y, 0) * T(f_x, f_y).$$

Здесь $A_i(f_x, f_y, 0)$ – угловой спектр падающей волны при *z* = 0, который равен:

$$A_i(f_x, f_y, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} U_i(x, y, 0) \cdot \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)]dxdy; \quad (1)$$

$T(f_x, f_y)$ – фурье-образ функции пропускания экрана, определяемый выражением, аналогичным (1).

Угловой спектр прошедшей волны при *z* > 0 имеет вид [23]

$$A_t(f_x, f_y, z) = A_i(f_x, f_y, 0) \cdot \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-\lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \cdot z\right). \quad (2)$$

Комплексная амплитуда прошедшей волны при *z* > 0 вычисляется обратным преобразованием Фурье от $A_t(f_x, f_y, z)$, т. е. с учетом (2) имеем

$$U_t(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} A_t(f_x, f_y, 0) \cdot \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-\lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \cdot z\right) \cdot \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)]df_x df_y. \quad (3)$$

При $f_x^2 + f_y^2 > 1/\lambda^2$ подкоренное выражение в (3) становится отрицательным. Поэтому волны, соответствующие данным пространственным частотам, затухающие (эвансцентные [24]) и быстро ослабляются с удалением от экрана с шаблонной структурой. Можно считать, что они не попадают в оптическую систему, фокусирующую дифракционную картину от шаблонной структуры на экран-приемник. Следовательно, для комплексной амплитуды $\tilde{U}_t(x, y, z)$ волны, прошедшей через шаблонную структуру и попадающей в оптическую фокусирующую систему, из (3) получим выражение

$$\tilde{U}_t(x, y, z) = \iint_{D_\lambda} A_t(f_x, f_y, 0) \cdot \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-\lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \cdot z\right) \cdot \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)]df_x df_y,$$

где $D_\lambda : f_x^2 + f_y^2 < 1/\lambda^2$ – область двумерного фурье-пространства.

Если на экран падает одна плоская волна единичной амплитуды, то

$$A_i(f_x, f_y, 0) = \delta(f_x, f_y),$$

где $\delta(f_x, f_y)$ – дельта-функция в двумерном фурье-пространстве.

Тогда

$$A_t(f_x, f_y, 0) = T(f_x, f_y),$$

и для $\tilde{U}_t(x, y, z)$ получим [23]

$$\tilde{U}_t(x,y,z) = \iint_{D_\lambda} T(f_x, f_y) \cdot \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-\lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \cdot z \right) \times \\ \times \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y . \tag{4}$$

В случае одномерных шаблонных структур с трансляционной симметрией бесконечного порядка относительно оси y двумерные прямое и обратное преобразования Фурье следует заменить на одномерные по x и f_x. В этом случае вместо (4) имеем

$$\tilde{U}_t(x,z) = \int_{-1/\lambda}^{1/\lambda} T(f_x) \cdot \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-\lambda^2 f_x^2} \cdot z \right) \cdot \exp[i2\pi f_x x] df_x . \tag{5}$$

Здесь

$$T(f_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} t(x) \cdot \exp[-i2\pi f_x x] dx , \tag{6}$$

где $t(x)$ – функция пропускания экрана с одномерной шаблонной структурой.

Пусть одномерная шаблонная структура состоит из четного количества $n = 2N_x$ одинаковых бесконечных промежутков (щелей) шириной b, разделенных между собой одинаковыми частично прозрачными фазосдвигающими полосами шириной a. Количество полос равно $2N_x - 1$. Вся эта структура помещена в окно соответствующего размера в непрозрачном экране. Комплексный амплитудный коэффициент пропускания полос обозначим как $\tilde{t}_b$ и представим в виде

$$\tilde{t}_b = \left|\tilde{t}_b\right| \cdot \exp(i\delta) ,$$

где δ – изменение фазы волны при прохождении через данные полосы.

Направим ось x перпендикулярно полосам, а начало координат возьмем на середине центральной полосы. Тогда функция пропускания экрана с шаблонной структурой будет иметь вид

$$t(x) = \begin{cases} \tilde{t}_b, & x \in [k(a+b) - a/2;\, k(a+b) + a/2], \\ & k = -N_x + 1, -N_x + 2, \ldots, N_x - 1; \\ 1, & x \in [k(a+b) + a/2;\, (k+1)(a+b) - a/2], \\ & k = -N_x, -N_x + 1, \ldots, N_x - 1; \\ 0, & |x| > N_x(a+b) - a/2 . \end{cases}$$

Вычисляя по формуле (6) фурье-образ функции пропускания, получаем

$$T(f_x) = \tilde{t}_b \frac{\sin(\pi f_x a)}{\pi f_x}\left(1 + 2\sum_{k=1}^{N_x-1}\cos[2\pi f_x k(a+b)]\right) + \\ + 2\frac{\sin(\pi f_x b)}{\pi f_x}\sum_{k=0}^{N_x-1}\cos[\pi f_x(2k+1)(a+b)]. \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение. На основе выражений (5), (7) проведено моделирование дифракционной картины от одномерных шаблонных структур с параллельными бесконечными щелями и частично прозрачными фазосдвигающими полосами между ними при разных значениях ширины щелей b и полос a, коэффициентов пропускания полос, при разных количествах полос для длины волны излучения λ = 193, 248 и 365 нм. Расстояние от шаблонной структуры до экрана-приемника $z = 0$. Сдвиг фазы в фазосдвигающих полосах равен 180°. Падающая волна на экран с шаблонной структурой считалась линейно-поляризованной, в качестве возмущения $U_i(x, y, z)$ принята комплексная амплитуда соответствующей компоненты напряженности электрического поля. В частности, если волна линейно поляризована в плоскости yz (рассматривался именно такой случай), то это величина

$$\tilde{E}_y(x, y, z) = E_{y0}(x, y, z) \cdot \exp[i\delta_y(x, y, z)],$$

где $E_{y0}(x, y, z)$ и $\delta_y(x, y, z)$ – соответственно амплитуда и фаза y-компоненты напряженности электрического поля в волне в зависимости от координат точки пространства.

В зависимости от x рассчитывали амплитуду напряженности электрического поля, ее действительную, мнимую части и нормированную относительную интенсивность электромагнитного излучения $I = \left|\tilde{E}_y\right|^2$ (при абсолютном значении амплитуды напряженности электрического поля, равном 1, интенсивность также равна 1). Амплитуда падающего излучения равна 1.

На рис. 1 приведены характерные зависимости интенсивности I в дифракционной картине от двух щелей с тремя вариантами полосы между ними ($a = b$ = 70 нм, λ = 193 нм). Видно преимущество использования полупрозрачного фазосдвигающего слоя. Следует отметить, что варианты с размерами $a = b$ = 90 нм при λ = 248 нм и $a = b$ = 132 нм при λ = 365 нм аналогичны варианту с размерами $a = b$ = 70 нм при λ = 193. Высокая контрастность дифракционной картины $V = (I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min})$ имеет решающее значение при реализации процесса фотолитографии [25]. Можно видеть, что если полосы фотошаблонной структуры полностью не прозрачные, картина слабоконтрастная (V = 0,11). Замена полосы на фазосдвигающую позволяет значительно повысить контрастность, при коэффициенте пропускания T = 0,36 контрастность V = 0,92.

При использовании массива щелей фотошаблонной структуры ситуация может стать критической как для непрозрачных, так и для полупрозрачных фазосдвигающих полос. На рис. 2, *а* показана дифракционная картина фотошаблонной структуры с 12 щелями. При $a = b$ = 112 нм дифракционная картина имеет «перевернутый» характер, т. е. на позициях, где фотошаблон имеет минимумы, наблюдаются максимумы, и наоборот. Это свидетельствует о том, что суммарный размер щели и полосы в данном случае слишком мал для данной длины волны и данного количества щелей в структуре. Ситуация изменится, если суммарный размер щели и полосы будет близок длине волны излучения или больше.

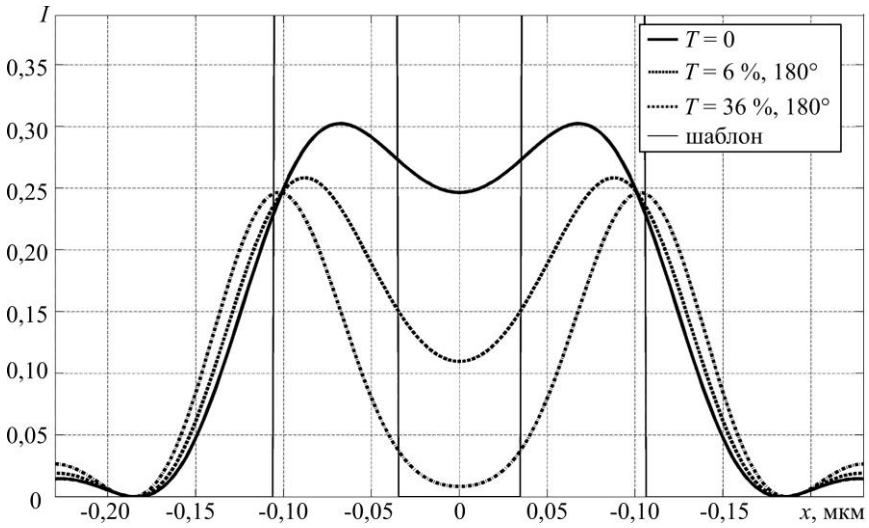


Рис. 1. Дифракционная картина от двух бесконечных щелей, параллельных оси *y*, для трех вариантов оптических характеристик полос между ними ($a = b = 70$ нм, $\lambda = 193$ нм)

Fig. 1. Diffraction pattern from two infinite gaps parallel to the *y*-axis, for three variants of optical characteristics of the lines between them ($a = b = 70$ nm, $\lambda = 193$ nm)

На рис. 2, *б* показана контрастная картина для $a = 112$ нм и $b = 134{,}4$ нм, т. е. когда суммарная ширина полосы и щели составляет 246,4 нм, что немного меньше длины волны излучения (248 нм), даже для непрозрачной полосы. При этом использование фазосдвигающей полосы с прозрачностью 8 % обеспечивает дополнительное повышение контрастности на 15 %. Проведенные расчеты для фотошаблонных структур с размерами $a = 87$ нм, $b = 104{,}4$ нм и $\lambda = 193$ нм и $a = 164{,}5$ нм, $b = 197{,}4$ нм и $\lambda = 365$ нм показали полную идентичность результату на рис. 2, *б*, поскольку для них соблюдается аналогичное условие соотношения $a + b$. Следует отметить, что во всех случаях контрастных дифракционных картин при наличии множества чередующихся полос и щелей максимумы у края выше, чем в центральной части дифракционной картины. Это является нежелательным эффектом при реализации фотолитографии, который требуется устранить.

Дифракционную картину с одинаковой контрастностью при одной и той же длине волны излучения можно получить, используя различные варианты структуры фотошаблона, которые отличаются друг от друга шириной щелей и фазосдвигающих полос, а также коэффициентом пропускания последних. На рис. 3 приведена зависимость ширины фазосдвигающих полос от длины волны излучения для трех вариантов структур фотошаблона с $n = 100$ щелями, когда в средней части дифракционной картины достигается контрастность $V \approx 0{,}8$. В качестве базовых подобраны структуры для $\lambda = 248$ нм. Для первого варианта $a = 112$ нм, $b = 1{,}213a = 135{,}86$ нм, $a + b = 247{,}86$ нм, коэффициент пропускания фазосдвигающих полос $T = 0$; для второго – $a = 100$ нм, $b = 1{,}4757a = 147{,}57$ нм, $a + b = 247{,}57$ нм, $T = 0{,}06$; для третьего – $a = 88$ нм, $b = 1{,}8116a = 159{,}42$ нм, $a + b = 247{,}42$ нм, $T = 0{,}25$. При пропорциональном изменении линейных параметров структуры получаемые дифракционные картины аналогичны, поэтому зависимость на рис. 3 имеет линейный характер. При фиксированных длине волны и контрастности уменьшение ширины фазосдвигающей полосы сопровождается небольшим уменьшением периода решетки. При этом коэффициент пропускания полосы должен принимать бóльшие значения.

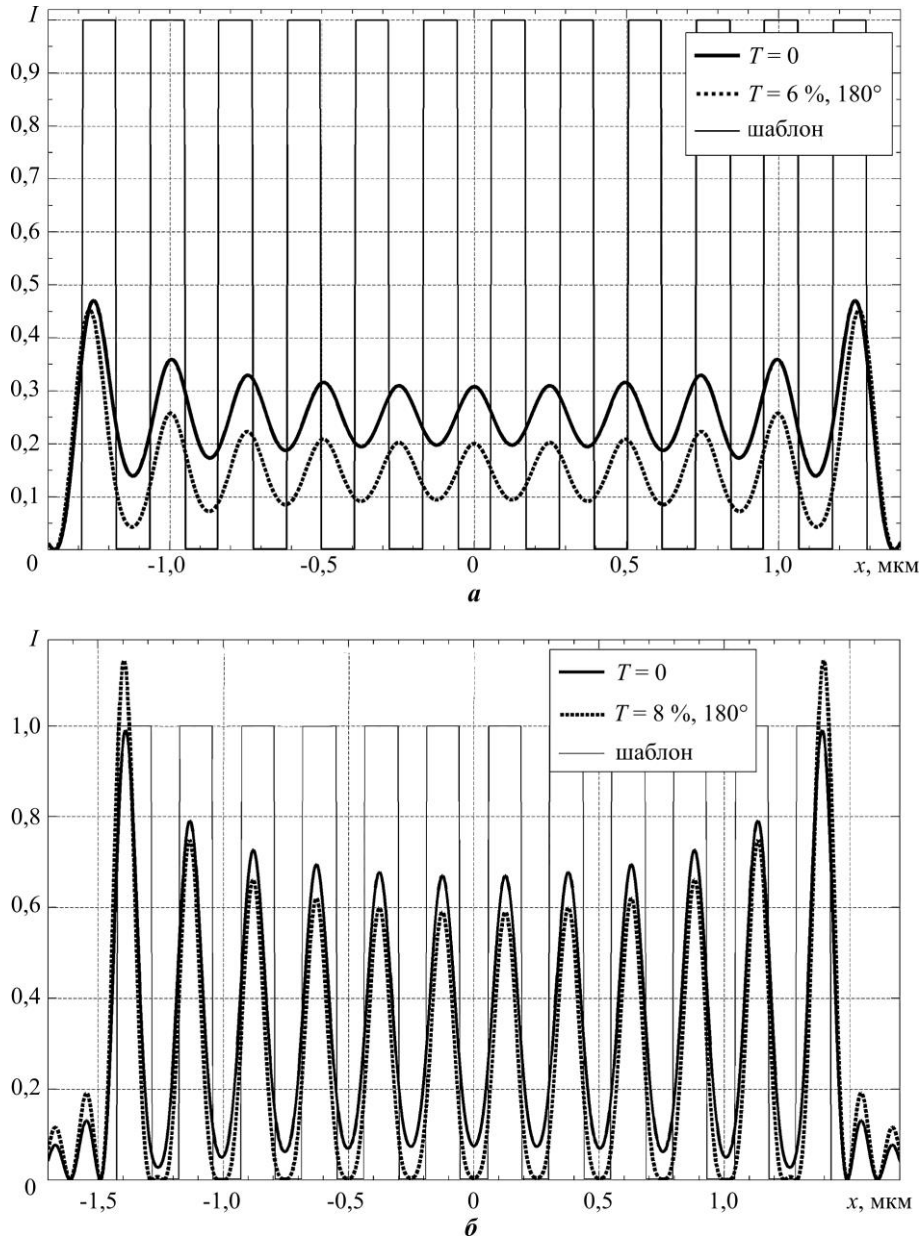


Рис. 2. Дифракционные картины от двенадцати бесконечных щелей при λ = 248 нм: *а* – *a* = *b* =112 нм; *б* – *a* = 112 нм; *b* = 134,4 нм

Fig. 2. Diffraction patterns from twelve infinite gaps at a λ = 248 nm: *a* – *a* = *b* =112 nm; *b* – *a* = 112 nm; *b* = 134,4 nm

Смоделировано влияние отклонения сдвига фазы в фазосдвигающих полосах от 180° на контрастность дифракционной картины. На рис. 4 приведена зависимость контрастности дифракционной картины от сдвига фазы фазосдвигающих полос для трех вариантов структуры фотошаблона при λ = 248 нм. Анализ данных зависимостей показывает, что отклонение сдвига фазы от идеального значения (180°) проявляется сильнее для структур с большим коэффициентом пропускания (*T* = 0,15). При малом пропускании (*T* = 0,03) уменьшение сдвига фазы до 150° приводит к незначительному (не более 3 %) уменьшению контрастности дифракционной картины. Можно отметить, что изменение сдвига фазы на 15° в обе стороны допустимо и незначительно (не более 3 %) уменьшает контрастность дифракционной картины.

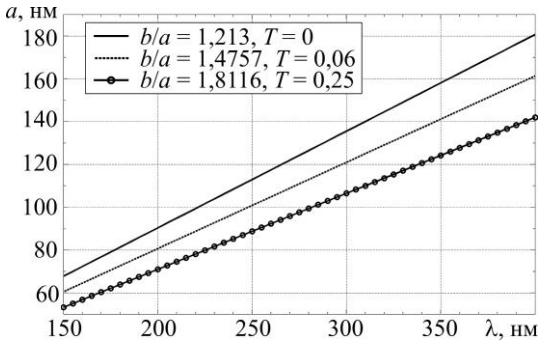


Рис. 3. Зависимость ширины полосы a с фиксированной контрастностью $V = 0{,}8$ в средней части дифракционной картины от длины волны излучения λ для трех вариантов структуры фотошаблона при $n = 100$

Fig. 3. Dependence of the size a with a fixed contrast $V = 0.8$ in the middle part of the diffraction pattern on the radiation wavelength λ for three variants of the photomask structure at $n=100$

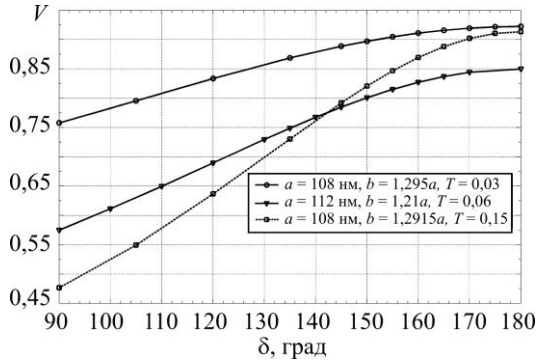


Рис. 4. Зависимость контрастности V в средней части дифракционной картины от фазового сдвига δ фазосдвигающих полос фотошаблона для трех вариантов его структуры при λ = 248 нм, $n = 100$

Fig. 4. Dependence of the contrast V in the middle part of the diffraction pattern on the magnitude of the phase shift δ of the phase-shifting material lines of the photomask for three variants of its structure at a λ = 248 nm, n =100

Другим важным параметром фазосдвигающих слоев, оказывающим влияние на контрастность дифракционной картины, является их коэффициент пропускания T. На рис. 5 приведены данные зависимости для трех вариантов структуры с линейными параметрами, соответствующими зависимостям на рис. 4. Количество щелей структуры $n = 100$, фазовый сдвиг полос равен 180°.

Для первого варианта период структуры $a + b = 247{,}52$ нм, для второго – 247,32 нм, для третьего – 247,48 нм. Анализ зависимостей показывает, что в данном диапазоне изменения коэффициента пропускания полос ($0 < T < 0{,}4$) с повышением коэффициента пропускания контрастность в средней части дифракционной картины увеличивается. Дальнейшее повышение коэффициента пропускания полос может привести к нежелательному эффекту: в частях дифракционной картины, соответствующих фазосдвигающим полосам, появляются максимумы интенсивности. Данные зависимости также показывают, что при фиксированном коэффициенте пропускания фазосдвигающих полос большую контрастность обеспечивают структуры с большим пространственным периодом.

На рис. 6 приведена зависимость контрастности в средней части дифракционной картины от количества полос (или щелей) фотошаблона. Рассмотрены три варианта структуры с периодами: $a + b = 247{,}44$ нм; $a + b = 247{,}48$ нм; $a + b = 248{,}00$ нм. Видно, что, когда пространственный период структуры меньше длины волны, увеличение числа полос приводит к уменьшению контрастности картины, причем скорость убывания больше у структуры с меньшим периодом. В то же время, если период структуры больше или равен длине волны излучения, количество полос практически не влияет на контрастность в средней части дифракционной картины.

Изучено влияние отношения ширины прозрачных щелей в структуре на ширину фазосдвигающих полос между ними b/a на контрастность дифракционной картины от фотошаблона для трех вариантов его структуры (рис. 7). Анализ приведенных на рис. 7 зависимостей показывает, что увеличение отношения b/a приводит к усилению контрастности, при этом имеет место «насыщение», т. е., начиная с некоторого значения b/a, контрастность выходит на свой максимальный уровень $V = 1$. При этом при сравнении структур с одинаковой шириной полосы при одном и том же значении b/a большее значение

контрастности имеет структура с бóльшим коэффициентом пропускания полос (рис. 7, *б*). Для всех вариантов (см. рис. 6) максимальный уровень контрастности всегда реализуется при сумме $a + b$, равной длине волны излучения.

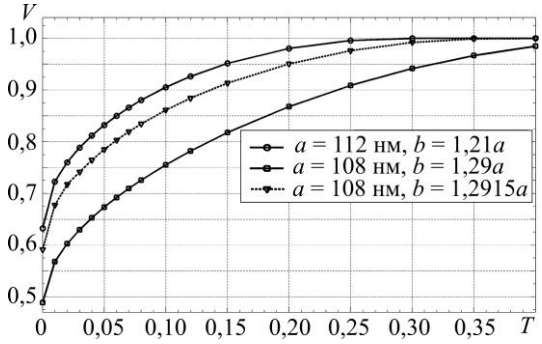


Рис. 5. Зависимость контрастности V в средней части дифракционной картины от коэффициента пропускания T фазосдвигающих полос фотошаблона для трех вариантов его структуры при $\lambda = 248$ нм, $n = 100$

Fig. 5. Dependence of the contrast V in the middle part of the diffraction pattern on the transmittance T of the phase-shifting material lines of the photomask for three variants of its structure at a $\lambda = 248$ nm, $n = 100$

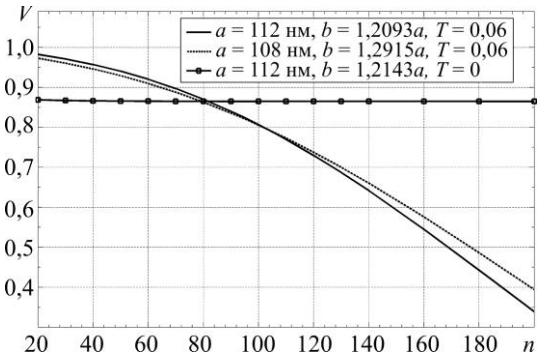
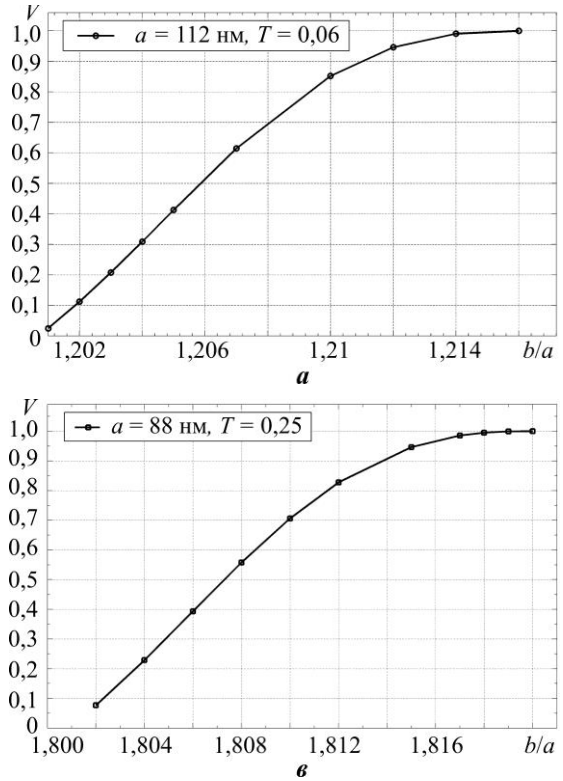


Рис. 6. Зависимость контрастности в V средней части дифракционной картины от количества фазосдвигающих полос n фотошаблона для трех вариантов его структуры при $\lambda = 248$ нм

Fig. 6. Dependence of contrast V in the middle part of the diffraction pattern on the number of phase-shifting material lines n of the photomask for three variants of its structure at a $\lambda = 248$ nm



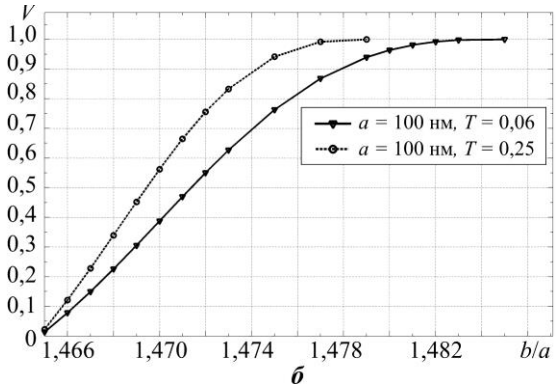


Рис. 7. Зависимости контрастности V в средней части дифракционной картины от соотношения b/a фотошаблона для трех вариантов (*а–в*) его структуры при $\lambda = 248$ нм, $n = 100$

Fig. 7. Contrast V dependences in the middle part of the diffraction pattern on the b/a ratio of the photomask for three variants (*a–c*) of its structure at a $\lambda = 248$ nm, $n = 100$

Таким образом, применение фазосдвигающих полос эффективно для улучшения контрастности воздушного изображения от фотошаблонной структуры. Для внедрения данного подхода необходимо решать проблему неоднородности распределения контрастности, которая возникает при большом множестве чередующихся полос и щелей (см. рис. 2) и которая имеет место в реальном процессе фотолитографии. В качестве преодоления данного принципиального ограничения, по-видимому, могут быть использованы следующие способы: нарушение регулярности структуры, т. е. не периодическая, а квазипериодическая структура с небольшой вариацией ширины полос и/или щелей; использование внеосевых источников излучения [26]. В частности, моделирование реализации первого способа показано рис. 8.

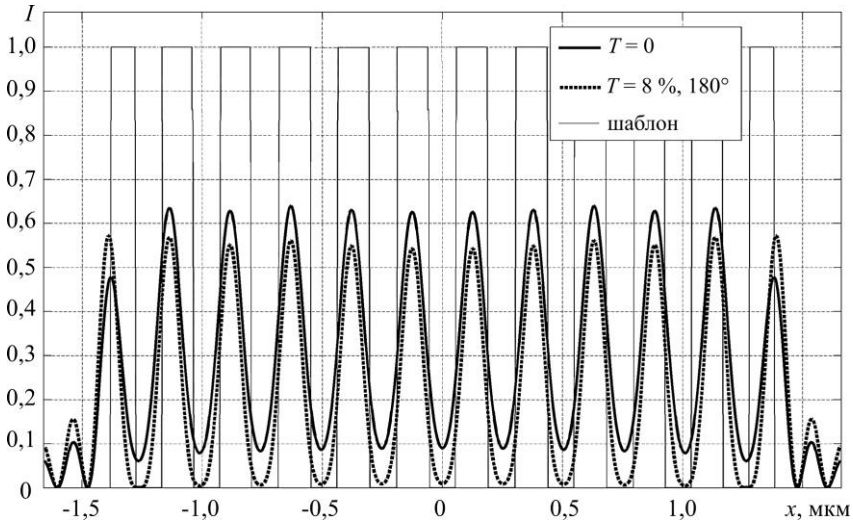


Рис. 8. Дифракционные картины от двенадцати бесконечных щелей при λ = 248 нм (a = 112 нм, ширина щелей в центральной части структуры: b = 1,2a = 134,4 нм, ширина щелей в крайних частях: $b_{\pm4}$ = 131,4 нм, $b_{\pm5}$ = 128,4 нм, $b_{\pm6}$ = 101,4 нм)
Fig. 8. Diffraction patterns from twelve infinite gaps at a λ = 248 nm with opaque (a = 112 nm, the width of the gaps in the central part of the structure b = 1.2a = 134.4 nm, the width of the gaps in the extreme parts: $b_{\pm4}$ = 131.4 nm, $b_{\pm5}$ = 128.4 nm, $b_{\pm6}$ = 101.4 nm)

Для 12-щелевой структуры при a = 112 нм для выравнивания пиков дифракционной картины использовано нарушение периодичности за счет уменьшения ширины щелей в крайних частях структуры: если центральные щели ±1, ±2, ±3 имели одинаковую ширину 134,4 нм, то щели на краях ±4 – 131,4 нм, ±5 – 128,4 нм, ±6 – 101,4 нм. Как показано на рис. 8, для такой структуры контрастность дифракционной картины становится однородной.

Заключение. При использовании большого массива элементов в литографическом процессе получение высокой контрастности гарантировано, когда суммарные размеры элемента и промежутка не меньше длины волны излучения (при условии, что числовая апертура фокусирующей системы равна 1). С учетом того, что при проекционной литографии размеры элемента на подложке в четыре раза меньше, чем на шаблоне, расчеты показывают, что при использовании бинарного хромового фотошаблона можно получать элементы с размерами ~ 22 нм при λ = 193 нм; ~ 17 нм при применении фазосдвигающего фотошаблона; ~ 28 и ~ 22 нм при λ = 248 нм; ~ 45 и ~ 32 нм при λ = 365 нм. Использование фазосдвигающего фотошаблона благодаря обеспечению более высокой

контрастности позволяет дополнительно уменьшить размеры элементов, когда суммарные размеры элемента и промежутка меньше длины волны излучения. Однако в этом случае контрастность дифракционной картины начинает существенно зависеть от фазового сдвига и, следовательно, требуется поддерживать его неизменность. Наилучшей контрастности также можно добиться путем варьирования коэффициента пропускания фазосдвигающих полос.

Литература

1. ***Pimpin A., Srituravanich W.*** Review on micro- and nanolithography techniques and their applications // Eng. J. 2012. Vol. 16. No. 1. P. 37–56. https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.37

2. ***Judy J. W.*** Microelectromechanical systems (MEMS): Fabrication, design and applications // Smart Mater. Struct. 2001. Vol. 10. No. 6. P. 1115–1134. https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/6/301

3. ***Rothschild M.*** Projection optical lithography // Mater. Today. 2005. Vol. 8. Iss. 2. P. 18–24. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)00698-X

4. ***Stulen R. H., Sweeney D. W.*** Extreme ultraviolet lithography // IEEE J. Quantum Electron. 1999. Vol. 35. No. 5. P. 694–699. https://doi.org/10.1109/3.760315

5. ***Wu B., Kumar A.*** Extreme ultraviolet lithography: A review // J. Vac. Sci. Technol. B. 2007. Vol. 25. Iss. 6. P. 1743–1761. https://doi.org/10.1116/1.2794048

6. ***Seisyan R. P.*** Nanolithography in microelectronics: A review // Tech. Phys. 2011. Vol. 56. P. 1061–1073. https://doi.org/10.1134/S1063784211080214

7. ***Ito T., Okazaki S.*** Pushing the limits of lithography // Nature. 2000. Vol. 406. No. 6799. P. 1027–1031. https://doi.org/10.1038/35023233

8. ***Pati Y. C., Kailath T.*** Phase-shifting masks for microlithography: Automated design and mask requirements // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. Vol. 11. Iss. 9. P. 2438–2452. https://doi.org/10.1364/JOSAA.11.002438

9. Attenuated phase-shifting mask with a single-layer absorptive shifter of CrO, CrON, MoSiO, and MoSiON film / ***M. Nakajima, N. Yoshioka, J. Miyazaki et al.*** // Proc. SPIE. Optical/Laser Microlithography VII. 1994. Vol. 2197. Art. ID: 175405. https://doi.org/10.1117/12.175405

10. Practical attenuated phase-shifting mask with a single-layer absorptive shifter of MoSiO and MoSiON for ULSI fabrication / ***N. Yoshioka, J. Miyazaki, H. Kusunose et al.*** // Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting. Washington, DC: IEEE, 1993. P. 653–656. https://doi.org/10.1109/IEDM.1993.347227

11. Attenuated phase-shift mask blanks with oxide or oxinitride of Cr or MoSi absorptive shifter / ***Y. Saito, S. Kawada, T. Yamamoto et al.*** // Proc. SPIE. Photomask and X-Ray Mask Technology. 1994. Vol. 2254. Art. ID: 191962. https://doi.org/10.1117/12.191962

12. ***Steigerwald H., Han R., Buettner A., Roeth K.-D.*** LMS IPRO: Enabling accurate registration metrology on SiN-based phase-shift masks // Proc. SPIE. Photomask Japan 2017. 2017. Vol. 10454. Art. ID: 2279676. https://doi.org/10.1117/12.2279676

13. Effects of mask pattern transmission on ArF lithographic performance in contact hole patterning / ***N. Yonemaru, K. Matsui, Y. Kojima et al.*** // J. Micro/Nanopattern. Mats. Metro. 2021. Vol. 20. Iss. 1. Art. ID: 014401. https://doi.org/10.1117/1.JMM.20.1.014401

14. Intensity distribution modulation of multiple beam interference pattern / ***D. Jochcova, J. Kaufman, P. Hauschwitz et al.*** // MM Science Journal. 2019. Iss. Dec. P. 3652–3656. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_12_2019117

15. ***Yoshizawa M., Philipsen V., Leunissen L. H. A.*** Optimizing absorber thickness of attenuating phase-shifting masks for hyper-NA lithography // Proc. SPIE. Optical Microlithography XIX. 2006. Vol. 6154. Art. ID: 659823. https://doi.org/10.1117/12.659823

16. Comparative study of bi-layer attenuating phase-shifting masks for hyper-NA lithography / ***M. Yoshizawa, V. Philipsen, L. H. A. Leunissen et al.*** // Proc. SPIE. Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XIII. 2006. Vol. 6283. Art. ID: 62831G. https://doi.org/10.1117/12.681883

17. Frequency doubling and phase error tolerance exploration for chrome-less phase shift mask / ***L. Li, M. Jiang, D. Liang et al.*** // Proc. SPIE. Optical and EUV Nanolithography XXXVI. 2023. Vol. 12494. Art. ID: 1249413. https://doi.org/10.1117/12.2657844

18. Imaging study of phase shift spatial light modulator for digital scanner / ***Y. Watanabe, Y. Kanaya, Y. Okudaira et al.*** // Proc. SPIE. Optical and EUV Nanolithography XXXVII. 2024. Vol. 12953. Art. ID: 129530R. https://doi.org/10.1117/12.3010082

19. Impact of alternative mask stacks on the imaging performance at NA 1.20 and above / ***V. Philipsen, K. Mesuda, P. De Bisschop et al.*** // Proc. SPIE. Photomask Technology 2007. 2007. Vol. 6730. Art. ID: 67301N. https://doi.org/10.1117/12.746678

20. A method of utilizing AIMS to quantify lithographic performance of high transmittance mask / ***Chun Seon Choi, Dong Sik Jang, Sung Hyun Oh et al.*** // Proc. SPIE. Photomask Technology 2014. 2014. Vol. 9235. Art. ID: 92351R. https://doi.org/10.1117/12.2066283

21. Attenuated phase-shift mask with high tolerance for 193nm radiation damage / ***T. Yamazaki, R. Gorai, Y. Kojima et al.*** // Proc. SPIE. Photomask Technology 2011. 2011. Vol. 8166. Art. ID: 81663V. https://doi.org/10.1117/12.898984

22. ***Chen F. T., Chen W.-S., Tsai M.-J., Ku T.-K.*** Sidewall profile inclination modulation mask (SPIMM): modification of an attenuated phase-shift mask for single-exposure double and multiple patterning // Proc. SPIE. Optical Microlithography XXVI. 2013. Vol. 8683. Art. ID: 868311. https://doi.org/10.1117/12.2008886

23. ***Гудмен Дж.*** Введение в фурье-оптику / пер. с англ. В. Ю. Галицкого, М. П. Головея. М.: Мир, 1970. 364 с.

24. ***Салех Б., Тейх М.*** Оптика и фотоника: принципы и применения / пер. с англ. В. Л. Дербова. Т. 1. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 759 с.

25. ***Ландсберг Г. С.*** Оптика. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 926 с.

26. ***Ивин В. В., Махвиладзе Т. М., Валиев К. А.*** Теоретическое рассмотрение вопросов выбора оптимальной формы источника в оптической нанолитографии // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 3. С. 163–174. EDN: OWNIVL.

Статья поступила в редакцию 10.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 16.09.2024 г.; принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Лавров Игорь Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), iglavr@mail.ru

Дронова Дарья Алексеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), demetpatakai@gmail.com

Силибин Максим Викторович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sil_m@mail.ru

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

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

Лебедев Егор Александрович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Dr.beefheart@gmail.com

Шарипов Рустем Асгатович – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Sharipov769@mail.ru

Вигдорович Евгений Наумович – доктор технических наук, профессор, член диссертационного совета Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), evgvig@mail.ru

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

References

1. Pimpin A., Srituravanich W. Review on micro- and nanolithography techniques and their applications. *Eng. J.*, 2012, vol. 16, no. 1, pp. 37–56. https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.37

2. Judy J. W. Microelectromechanical systems (MEMS): Fabrication, design and applications. *Smart Mater. Struct.*, 2001, vol. 10, no. 6, pp. 1115–1134. https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/6/301

3. Rothschild M. Projection optical lithography. *Mater. Today*, 2005, vol. 8, iss. 2, pp. 18–24. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)00698-X

4. Stulen R. H., Sweeney D. W. Extreme ultraviolet lithography. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 694–699. https://doi.org/10.1109/3.760315

5. Wu B., Kumar A. Extreme ultraviolet lithography: A review. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2007, vol. 25, iss. 6, pp. 1743–1761. https://doi.org/10.1116/1.2794048

6. Seisyan R. P. Nanolithography in microelectronics: A review. *Tech. Phys.*, 2011, vol. 56, pp. 1061–1073. https://doi.org/10.1134/S1063784211080214

7. Ito T., Okazaki S. Pushing the limits of lithography. *Nature*, 2000, vol. 406, no. 6799, pp. 1027–1031. https://doi.org/10.1038/35023233

8. Pati Y. C., Kailath T. Phase-shifting masks for microlithography: Automated design and mask requirements. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, vol. 11, iss. 9, pp. 2438–2452. https://doi.org/10.1364/JOSAA.11.002438

9. Nakajima M., Yoshioka N., Miyazaki J., Kusunose H., Hosono K., Morimoto H., Wakamiya W., Murayama K. et al. Attenuated phase-shifting mask with a single-layer absorptive shifter of CrO, CrON, MoSiO, and MoSiON film. *Proc. SPIE, Optical/Laser Microlithography VII*, 1994, vol. 2197, art. ID: 175405. https://doi.org/10.1117/12.175405

10. Yoshioka N., Miyazaki J., Kusunose H., Hosono K., Nakajima M., Morimoto H., Watakabe Y., Tsukamoto K. Practical attenuated phase-shifting mask with a single-layer absorptive shifter of MoSiO and MoSiON for ULSI fabrication. *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting.* Washington, DC, IEEE, 1993, pp. 653–656. https://doi.org/10.1109/IEDM.1993.347227

11. Saito Y., Kawada S., Yamamoto T., Hayashi A., Isao A., Tokoro Y. Attenuated phase-shift mask blanks with oxide or oxinitride of Cr or MoSi absorptive shifter. *Proc. SPIE, Photomask and X-Ray Mask Technology*, 1994, vol. 2254, art. ID: 191962. https://doi.org/10.1117/12.191962

12. Steigerwald H., Han R., Buettner A., Roeth K.-D. LMS IPRO: Enabling accurate registration metrology on SiN-based phase-shift masks. *Proc. SPIE, Photomask Japan 2017*, 2017, vol. 10454, art. ID: 2279676. https://doi.org/10.1117/12.2279676

13. Yonemaru N., Matsui K., Kojima Y., Nagatomo T., Yamana M. Effects of mask pattern transmission on ArF lithographic performance in contact hole patterning. *J. Micro/Nanopattern. Mats. Metro.*, 2021, vol. 20, iss. 1, art. ID: 014401. https://doi.org/10.1117/1.JMM.20.1.014401

14. Jochcova D., Kaufman J., Hauschwitz P., Brajer J., Vanda J. Intensity distribution modulation of multiple beam interference pattern. *MM Science Journal*, 2019, iss. Dec., pp. 3652–3656. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_12_2019117

15. Yoshizawa M., Philipsen V., Leunissen L. H. A. Optimizing absorber thickness of attenuating phase-shifting masks for hyper-NA lithography. *Proc. SPIE, Optical Microlithography XIX*, 2006, vol. 6154, art. ID: 659823. https://doi.org/10.1117/12.659823

16. Yoshizawa M., Philipsen V., Leunissen L. H. A., Hendrickx E., Jonckheere R., Vandenberghe G., Buttgereit U., Becker H. et al. Comparative study of bi-layer attenuating phase-shifting masks for hyper-NA lithography. *Proc. SPIE, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XIII*, 2006, vol. 6283, art. ID: 62831G. https://doi.org/10.1117/12.681883

17. Li L., Jiang M., Liang D., Yan B., Gao M., Wu D., Lan A., Shi J. Frequency doubling and phase error tolerance exploration for chrome-less phase shift mask. *Proc. SPIE, Optical and EUV Nanolithography XXXVI*, 2023, vol. 12494, art. ID: 1249413. https://doi.org/10.1117/12.2657844

18. Watanabe Y., Kanaya Y., Okudaira Y., Kibayashi S., Sakamoto T., Mizuno Y., Masaki K., Owa S. et al. Imaging study of phase shift spatial light modulator for digital scanner. *Proc. SPIE, Optical and EUV Nanolithography XXXVII*, 2024, vol. 12953, art. ID: 129530R. https://doi.org/10.1117/12.3010082

19. Philipsen V., Mesuda K., De Bisschop P., Erdmann A., Citarella G., Evanschitzky P., Birkner R. et al. Impact of alternative mask stacks on the imaging performance at NA 1.20 and above. *Proc. SPIE, Photomask Technology 2007*, 2007, vol. 6730, art. ID: 67301N. https://doi.org/10.1117/12.746678

20. Chun Seon Choi, Dong Sik Jang, Sung Hyun Oh, Jae Cheon Shin, Byungho Nam, Tae Joong Ha, Sang Pyo Kim, Dong Gyu Yim. A method of utilizing AIMS to quantify lithographic performance of high transmittance mask. *Proc. SPIE, Photomask Technology 2014*, 2014, vol. 9235, art. ID: 92351R. https://doi.org/10.1117/12.2066283

21. Yamazaki T., Gorai R., Kojima Y., Haraguchi T., Tanaka T., Koitabashi R., Inazuki Y., Yoshikawa H. Attenuated phase-shift mask with high tolerance for 193nm radiation damage. *Proc. SPIE, Photomask Technology 2011*, 2011, vol. 8166, art. ID: 81663V. https://doi.org/10.1117/12.898984

22. Chen F. T., Chen W.-S., Tsai M.-J., Ku T.-K. Sidewall profile inclination modulation mask (SPIMM): modification of an attenuated phase-shift mask for single-exposure double and multiple patterning. *Proc. SPIE, Optical Microlithography XXVI*, 2013, vol. 8683, art. ID: 868311. https://doi.org/10.1117/12.2008886

23. Goodman J. W. *Introduction to Fourier optics.* New York, McGraw-Hill, 1968. xiv, 287 p.

24. Saleh B. A. E., Teich M. C. *Fundamentals of photonics.* New York, J. Wiley & Sons, 1991. xix, 966 p.

25. Landsberg G. S. *Optics.* 5th ed., rev. and upd. Moscow, Nauka Publ., 1976. 926 p. (In Russian).

26. Ivin V. V., Makhviladze T. M., Valiev K. A. Optimizing light-source aperture for off-axis illumination in optical nanolithography: Theoretical consideration. *Russ. Microelectron.*, 2004, vol. 33, iss. 3, pp. 127–136. https://doi.org/10.1023/B:RUMI.0000026169.36599.03

The article was submitted 10.09.2024; approved after reviewing 16.09.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Igor V. Lavrov – Cand. Sci. (Phys-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), iglavr@mail.ru

Daria A. Dronova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), demetpatakai@gmail.com

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

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

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

Egor A. Lebedev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Dr.beefheart@gmail.com

Rustem A. Sharipov – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Sharipov769@mail.ru

Evgeny N. Vigdorovich – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Member of the Dissertation Council, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), evgvig@mail.ru

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

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья
УДК 681.518.3
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-752-762
EDN: FRVEYO

Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в светодиодных матрицах

***А. М. Ходаков*[1], *В. А. Сергеев*[1,2], *И. В. Фролов*[1], *О. А. Радаев*[1], *С. А. Зайцев*[3]**

[1]*Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия*
[2]*Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия*
[3]*АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», г. Ульяновск, Россия*

ln23al@yandex.ru

Аннотация. В многокристальной светодиодной системе действуют различные механизмы теплоэлектрической обратной связи, которые приводят к неравномерному профилю температуры в конструкции. Это является причиной нагрева светодиодов, составляющих светодиодную матрицу, до критических значений температур и термомеханических напряжений, приводящих к ускорению процесса деградации и снижению расчетного срока безотказной работы прибора. В работе представлена теплоэлектрическая модель светодиодной матрицы, состоящей из n параллельно соединенных цепочек, содержащих по m последовательно соединенных кристаллов светодиодов, размещенных на монтажной пластине. Учтено перераспределение полного тока матрицы между цепочками в результате саморазогрева светодиодной матрицы. Математическое описание термоэлектрической модели включает в себя уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями и выражение для зависимости силы токов, протекающих через цепочки последовательно соединенных кристаллов светодиодов, от температуры. Профиль температуры в конструкции светодиодной матрицы найден с помощью специально разработанной программы, содержащей итерационное обращение к программной среде COMSOL Multiphysics, при этом исследована сходимость применяемого расчетного алгоритма. Показано, что перераспределение тока между цепочками последовательно соединенных кристаллов светодиодов приводит к существенному увеличению неравномерности профиля температуры по поверхности светодиодной матрицы. Получена зависимость коэффициента неравномерности профиля температуры по верхней поверхности светодиодной матрицы от силы тока. Проведена экспериментальная верификация модели.

© А. М. Ходаков, В. А. Сергеев, И. В. Фролов, О. А. Радаев, С. А. Зайцев, 2024

Ключевые слова: светодиодная матрица, теплоэлектрическая модель, профиль температуры, тепловые параметры, плотность мощности

Финансирование работы: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (№ FFWZ-2022-0002).

Для цитирования: Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в светодиодных матрицах / А. М. Ходаков, В. А. Сергеев, И. В. Фролов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 752–762. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-752-762. – EDN: FRVEYO.

Original article

Simulation and research of thermoelectric processes in LED matrixes

A. M. Khodakov[1], V. A. Sergeev[1,2], I. V. Frolov[1], O. A. Radaev[1], S. A. Zaitsev[3]

[1]Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia
[2]Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
[3]Ulyanovsk Instrument Engineering Design Bureau JSC, Ulyanovsk, Russia

ln23al@yandex.ru

Abstract. In a multichip LED system, various thermoelectric feedback mechanisms are acting that lead to inhomogeneous temperature pattern in the construction. This causes the LEDs forming LED matrix to heat up to critical values of temperatures and thermomechanical stresses leading to accelerated device degradation and to shortening of its designed no-failure lifetime. In this work, a thermoelectric model of an LED matrix consisting of *n* parallel-connected chains containing *m* series-connected LED chips placed on a mounting plate is presented. The redistribution of the total matrix current between the chains as a result of LED matrix self-heating is accounted for. Mathematical description of thermoelectric model consists of a thermal conductivity equation with appropriate boundary conditions and an expression for the temperature dependence of the strength of currents flowing through chains of series-connected LEDs. The temperature pattern in LED matrix design was found using a specially developed program that includes iterative access to the COMSOL Multiphysics software environment, with that the convergence of the applied calculation algorithm was studied. It was shown that the redistribution of current between series-connected LED chains leads to a significant increase in the inhomogeneity of the temperature distribution over LED matrix surface. The dependence of the coefficient of inhomogeneity of temperature distribution on the upper surface of LED matrix on the current strength has been obtained. Experimental verification of the model was carried out.

Keywords: LED matrix, thermoelectric model, temperature pattern, thermal parameters, power density

Funding: the work was carried out within the framework of the state task of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (no. FFWZ-2022-0002).

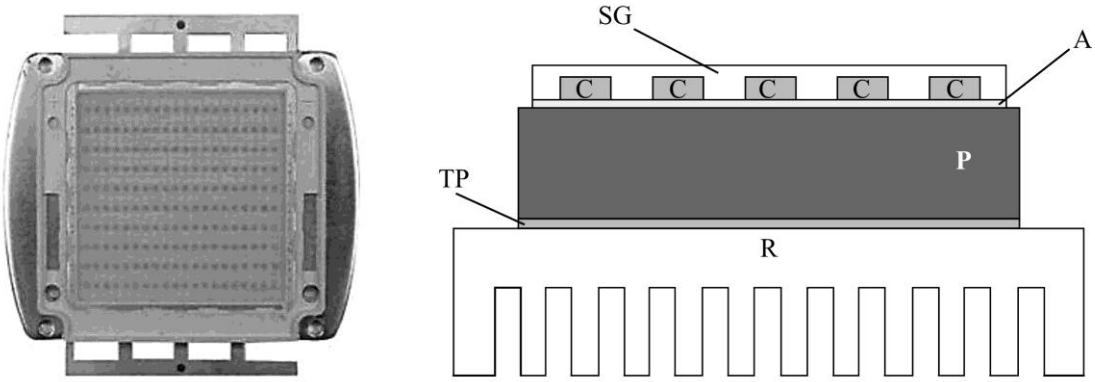
For citation: Khodakov A. M., Sergeev V. A., Frolov I. V., Radaev O. A., Zaitsev S. A. Simulation and research of thermoelectric processes in LED matrixes. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 752–762. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-752-762. – EDN: FRVEYO.

Введение. Эффективность и надежность светодиодных матриц (СМ) в большей степени определяется тепловыми режимами работы входящих в их состав светодиодов. Многокристальная СМ представляет собой сложную теплофизическую систему, в которой действуют различные механизмы теплоэлектрической обратной связи, приводящие к существенно неравномерному профилю температуры в конструкции. Это является причиной нагрева светоизлучающих диодов (СИД), составляющих СМ, до критических значений температур и термомеханических напряжений, вызывающих ускорение процессов деградации и снижение расчетного срока безотказной работы прибора. Поэтому необходимо более точное описание поведения электрических, светотехнических и теплофизических характеристик СМ в различных условиях эксплуатации.

Актуальность разработки тепловых моделей монокристаллических светодиодных устройств и способов повышения эффективности отвода тепла от активных элементов – СИД – подтверждается публикациями [1–6]. Как правило, тепловой расчет СМ проводится в линейном приближении с использованием принципа суперпозиции [7]. Однако для более точного приближения к реальной структуре СМ и условий ее работы в тех случаях, когда какие-либо условия решения задачи (плотность рассеиваемой тепловой мощности, теплофизические характеристики структуры СИД и т. д.) зависят от температуры, принцип суперпозиции становится неприменимым и необходима разработка нелинейных тепловых моделей [8]. При построении известных моделей в основном используется принцип теплоэлектрической аналогии: эквивалентная тепловая схема устройства представляется в виде цепи из параллельных *RC*-звеньев [9, 10]. Моделирование тепловых режимов работы СМ осуществляется с использованием теплофизических модулей моделирующих программ SPICE, TERM3, ANSYS, COMSOL и др. Большинство применяемых моделей и пакетов программ позволяет рассчитывать температурные поля при заданном распределении источников тепла и известных граничных условиях, но не учитывают различные механизмы теплоэлектрической обратной связи в структурах полупроводниковых приборов. Анализ и расчеты, представленные авторами, например, в работах [11, 12], показали наличие неравномерного профиля температуры и внутренних градиентов температуры в СИД.

Цель настоящей работы – разработка 3D-модели и проведение расчетных исследований СМ с учетом теплоэлектрической обратной связи (температурозависимое приближение), приводящей к нелинейной зависимости плотности рассеиваемой структурой тепловой мощности от температуры и к неравномерному профилю температуры в элементах конструкции СМ.

Теплоэлектрическая модель светодиодной матрицы. Объект исследования – СМ на основе кристаллов СИД большой мощности (рис. 1). В качестве конкретной моделируемой СМ выбрана конструкция ARPL-300W-BCB-7080-PW (Arlight, Россия) [13]. Светодиодные кристаллы DS-C15 фирмы BRIDGELUX [14] размером $l_x \times l_y \times l_z$ = = 1143 × 1143 × 150 мкм с эпитаксиальной гетероструктурой InGaN/GaN на сапфировой подложке присоединены с помощью адгезива толщиной δ_A = 20 мкм к алюминиевой плате размером $L_x \times L_y \times L_z$ = 47 × 47 × 2 мм. СМ представляет собой сборку из 300 кристаллов – двадцати параллельно соединенных цепочек, каждая из которых содержит 15 кристаллов СИД, соединенных последовательно. Суммарная максимальная мощность равна 300 Вт, соответствующий ей ток I = 7 А. Кристаллы СИД защищены силиконовым гелем, а СМ размещены на радиаторе.



а *б*

Рис. 1. Внешний вид светодиодной матрицы (*а*) и схема ее поперечного сечения (*б*): С – кристаллы СИД; Р – плата; А – адгезив; ТР – термопаста; SG – силиконовый гель; R – радиатор
Fig. 1. Appearance of the LED matrix (*a*) and diagram of its cross section (*b*): C – LED crystals; P – board; A – adhesive; TP – thermal paste; SG – silicone gel; R – radiator

На рис. 2 изображена применяемая при расчете температурных полей геометрия модели СМ, состоящая из трех элементов конструкции: светодиодных кристаллов, слоя адгезива и алюминиевой платы. Влияние на процесс теплопроводности слоев термопасты и радиатора (см. рис. 1, *б*) моделировали с помощью задания условия растекания теплового потока с нижней поверхности алюминиевой платы. Так как слой геля имеет низкую теплопроводность (λ_{SG} = 1 Вт/(м·К)), можно считать процесс теплообмена верхней поверхности модельной структуры с внешней средой адиабатным. Структура СМ симметрична, поэтому моделировали только ее четвертую часть.

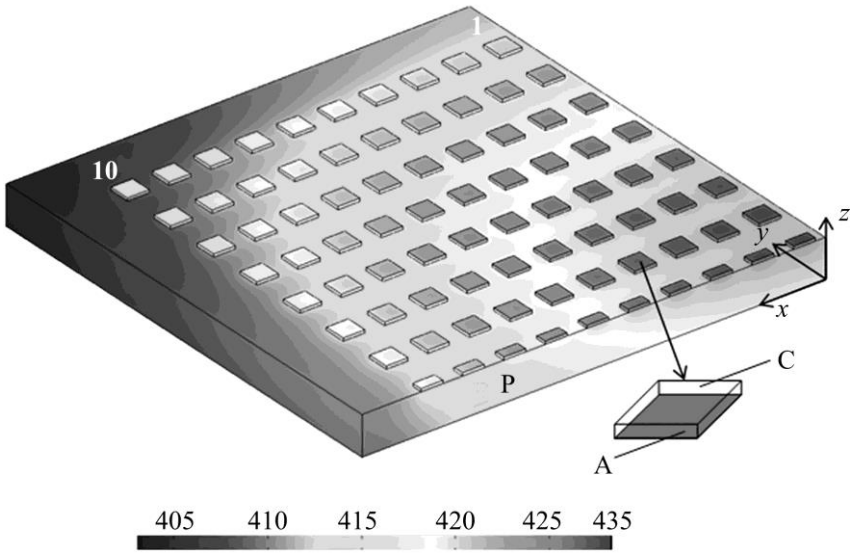


Рис. 2. Геометрия модели структуры и профиль температуры в СМ при $I_{СМ}$ = 7 А, $U_{СМ}$ = 42,9 В
Fig. 2. Geometry of the structure model and temperature distribution in the LED matrix with parameters $I_{СМ}$ = 7 A, $U_{СМ}$ = 42.9 V

Профиль температуры $T_s = T_s(x, y, z)$ в конструкции светодиодной матрицы находится из решения уравнения теплопроводности:

$$\nabla_{x,y,z}\left(\lambda_s(T_s)\nabla_{x,y,z}T_s(x, y, z)\right) = 0, \quad (1)$$

где λ_s – коэффициенты теплопроводности материалов конструкции СМ; s – индекс, соответствующий элементу конструкции (C, A, P, см. рис. 2).

Глубина залегания p–n-перехода СИД составляет, как правило, единицы микрон, что во много раз меньше толщины полупроводниковой подложки. Поэтому предполагалось, что источники тепла расположены на верхней поверхности кристалла СИД, на которой задается плотность мощности

$$q_{ij}\left(T_{ij}^{ar}\right) = J_i\left(T_{ij}^{ar}\right)U_{D_{ij}}\left(T_{ij}^{ar}\right), \quad (2)$$

где J_i – плотность тока, протекающего через СИД в i-й цепочке; $U_{D_{ij}}$ – падение напряжения на СИД; T_{ij}^{ar} – температура p–n-перехода СИД, расположенного в i-й цепочке под номером j (i = 1,...,n, j = 1,...,m).

На нижней границе структуры, которая находится в контакте с радиатором, задается условие растекания теплового потока:

$$-\lambda_{\text{P}}(T_{\text{P}})\left.\frac{\partial T_{\text{P}}}{\partial z}\right|_{z=0} = \alpha_{sp}\left(T_{\text{P}}\big|_{z=0} - T_r\right), \quad (3)$$

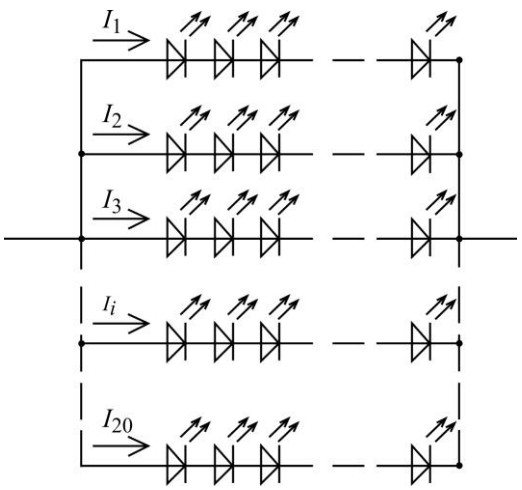


Рис. 3. Схема соединения светодиодов в СМ (n = 20, m = 15)
Fig. 3. Connection diagram of LEDs in LED matrix (n = 20, m = 15)

где $\alpha_{sp} = 1/\left(L_x L_y R_{sp}\right)$ – коэффициент теплообмена платы с радиатором; R_{sp} – тепловое сопротивление растекания; T_r – температура радиатора.

Коэффициент теплообмена α_{sp} является параметром модели, его начальное значение находится по изложенной в работе [15] методике, а затем уточняется итерационном методом согласно экспериментальным данным, полученным при измерении температуры перегрева выбранного элемента структуры СМ – p–n-перехода полупроводникового кристалла.

Схема соединения СИД в СМ показана на рис. 3 (число цепочек n = 20, число СИД в цепочке m = 15).

Если пренебречь сопротивлением базы СИД, то для тока I_i, протекающего через i-ю цепочку последовательно соединенных СИД (см. рис. 3), можно записать

$$I_i = A_{ij} \cdot \exp\left\{-\frac{E_g - eU_{D_{ij}}}{kT_{ij}^{ar}}\right\}, \quad (4)$$

где A_{ij} – слабо зависящий от температуры параметр СИД; E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника; k – постоянная Больцмана.

Параметр A_{ij} будем считать одинаковым для всех СИД (обозначим его символом A). Из выражения (4) можно найти падение напряжения на отдельном СИД:

$$U_{D_{ij}} = \frac{E_g}{e} - \frac{kT_{ij}^{ar}}{e}\ln\left(\frac{A}{I_i}\right). \quad (5)$$

Падение напряжения на i-й цепочке равно сумме падений напряжений на отдельных СИД в цепочке, при этом падение напряжения на всех параллельно соединенных цепочках одинаково и равно падению напряжения $U_{\text{СМ}}$ на СМ:

$$U_i = \sum_{j=1}^{m} U_{D_{ij}} = m\frac{E_g}{e} - \ln\left(\frac{A}{I_i}\right)\sum_{j=1}^{m}\frac{kT_{ij}^{ar}}{e} = U_{\text{СМ}}\left(T_{ij}^{ar}, I_{\text{СМ}}\right), \quad (6)$$

где $U_{\text{СМ}}$ зависит от температуры каждого СИД и полного тока $I_{\text{СМ}}$ через СМ.

Полный ток через СМ равен сумме токов через цепочки СИД:

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = I_{\text{СМ}}. \quad (7)$$

Очевидно, что в изотермическом приближении и при одинаковых электрических параметрах СИД токи через цепочки будут одинаковыми: $I_i = I_{\text{СМ}}/n$. При нагреве отдельных СИД и СМ в целом как внешним источником тепла, так и в результате саморазогрева и при поддержании полного тока матрицы постоянным ($I_{\text{СМ}}$ = const) падение напряжения на СМ будет изменяться таким образом, чтобы выполнялось условие (7), что будет приводить к перераспределению тока между цепочками СИД.

Представим токи I_i через полный ток $I_{\text{СМ}}$ в следующем виде: $I_i = \delta_i I_{\text{СМ}}$ (где $\delta_i < 1$ и $\sum_{i=1}^{n}\delta_i = 1$) и, подставляя это выражение в (6), получим следующее выражение для силы тока через i-ю цепочку:

$$I_i = I_{\text{СМ}} \cdot \exp\left\{\frac{U_{\text{СМ}} - m\frac{E_g}{e} + \ln\left(\frac{A}{I_{\text{СМ}}}\right)\sum_{j=1}^{m}\frac{kT_{ij}^{ar}}{e}}{\sum_{j=1}^{m}\frac{kT_{ij}^{ar}}{e}}\right\}. \quad (8)$$

Численное решение задачи и полученные результаты. Численное решение задачи теплопроводности (1)–(8) находили итерационным методом с помощью разработанной программы, включающей в себя программную среду модуля теплопроводности COMSOL. Зависимости от температуры коэффициентов теплопроводности материалов структуры выбирали из базы данных COMSOL. Коэффициент теплопроводности адгезива марки XH9960-1 $\lambda_{\text{А}}$ = 75 Вт/(м·К) [16].

Согласно расчетному профилю температуры по структуре СМ (см. рис. 2), наиболее нагретыми являются СИД, расположенные в центральной части области матрицы. Для уточнения значения коэффициента теплообмена α_{sp} через СМ пропускали ток силой 1 А. С помощью тепловизора определяли максимальную температуру нагрева верхней поверхности структуры (рис. 4) и в соответствии с ней корректировали найденное по методике [15] значение коэффициента теплообмена, которое составило 7545 Вт/(м^2·К).

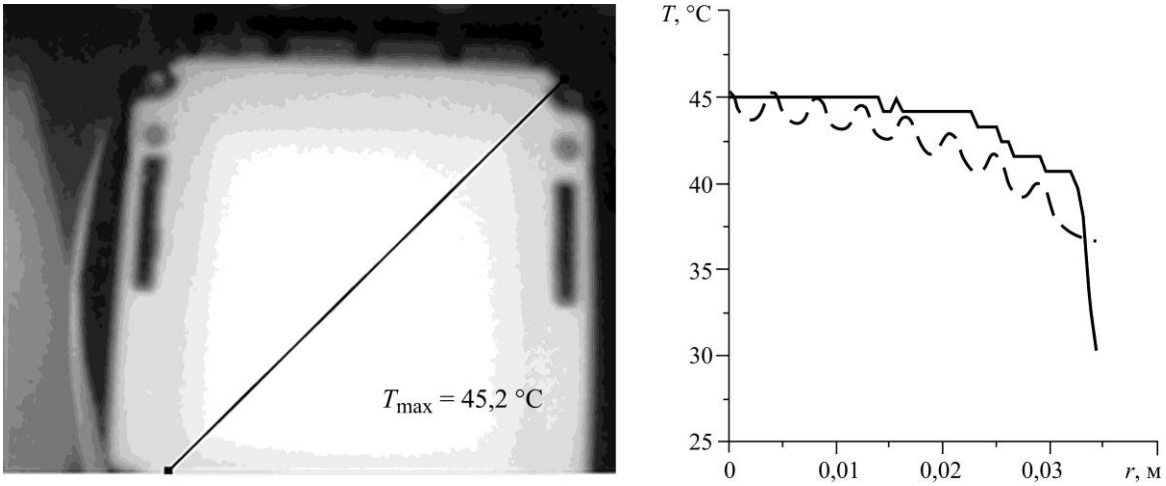


Рис. 4. Профиль температуры по диагонали верхней поверхности СМ при $I_{СМ}$ = 1 А, $U_{СМ}$ = 42 В (– – – – расчет по модели)

Fig. 4. Temperature distribution along the top diagonal LED matrix surface with parameters $I_{СМ}$ = 1 A, $U_{СМ}$ = 42 V (– – – – calculation using the model)

Значения токов, протекающих в цепочках последовательно соединенных СИД, рассчитывали по формуле (8) итерационным методом. В качестве начальных значений δ_i принимали значения $\delta_i^0 = 1/n$, для них рассчитывали начальный профиль температуры по структуре СМ. По найденным значениям $T_{ij}^{ar\,0}$ определяли новые значения δ_i, I_i и находили новый профиль температуры T_{ij}^{ar} и так далее до тех пор, пока разница между последовательными итерационными значениями рассчитываемых величин не достигала заданной степени точности. Условие $\sum_{i=1}^{n} \delta_i = 1$ на каждом итерационном шаге обеспечивалось соответствующим изменением (уменьшением) падения напряжения $U_{СМ}$ на СМ. На рис. 5 и 6 показаны сходимости итерационных расчетов для протекающих в цепочках СИД токов и значения максимального перегрева СМ от номера итерации N_{it}.

Учет температурной зависимости напряжения $U_{D_{ij}}$ согласно (5) и соответствующего ей распределения токов между цепочками последовательно соединенных СИД (8) показывает, что максимальное значение температуры структуры СМ будет больше, чем в случае приближения равенства токов, протекающих через цепочки последовательно соединенных СИД (рис. 7).

Введем коэффициент неравномерности профиля температуры по верхней поверхности СМ:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{av}}{\Delta T_{av}}, \qquad (9)$$

где ΔT_{max} и ΔT_{av} – максимальный и средний перегрев верхней поверхности СМ соответственно.

Расчеты зависимости коэффициента неравномерности от полного тока, поступающего в СМ, в температуронезависимом и температурозависимом приближениях представлены на рис. 8. Из рисунка видно, что разница между коэффициентами неравномерности, рассчитанными в указанных приближениях, резко возрастает с увеличением силы тока.

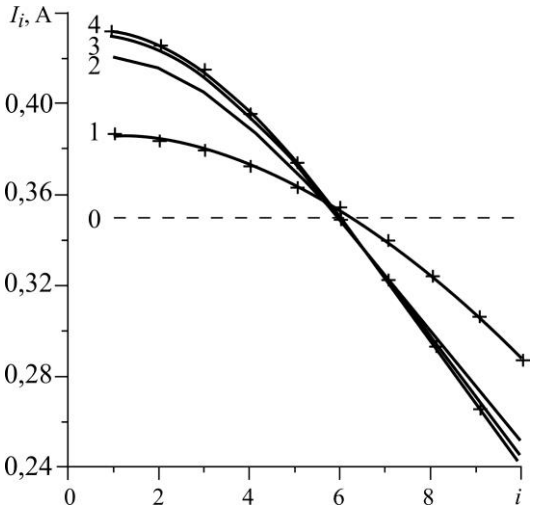


Рис. 5. Итерационная сходимость для токов в цепочках СИД (0–4 – номера итераций N_{it})
Fig. 5. Iterative convergence for currents in LED chains (0–4 – the iteration numbers N_{it})

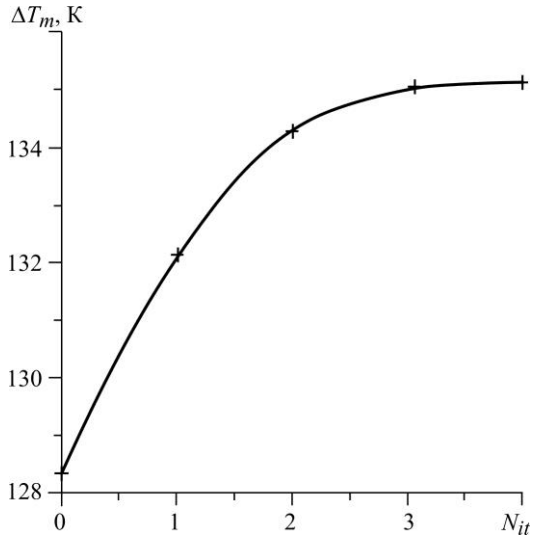


Рис. 6. Итерационная сходимость значения максимального перегрева структуры СМ
Fig. 6. Iterative convergence for the maximum overheating value of the LED matrix structure

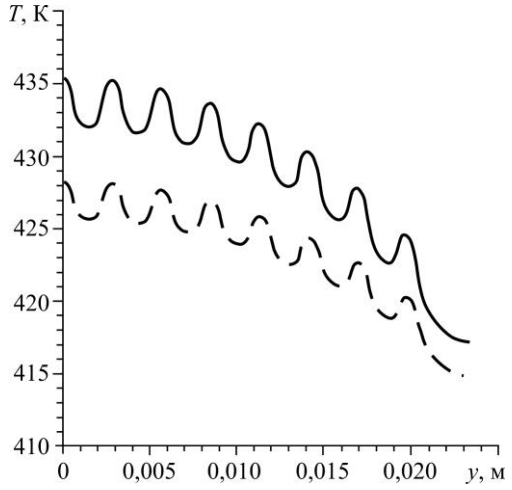


Рис. 7. Профиль температуры вдоль цепочки СИД при $I_{СМ}$ = 7 А (– – – – изотермическое приближение)
Fig. 7. Temperature distribution along the LED chain with parameters $I_{СМ}$ = 7 A (– – – – isothermal approximation)

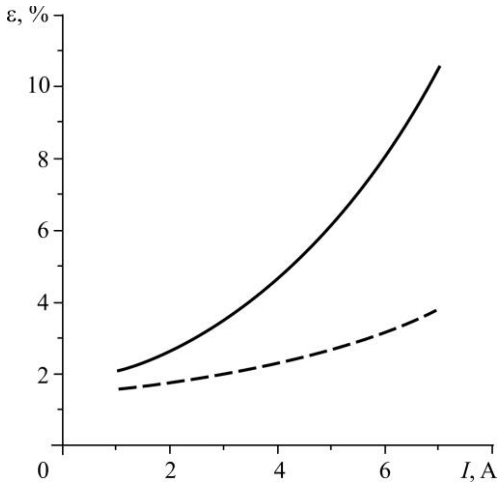


Рис. 8. Коэффициент неравномерности профиля температуры по верхней поверхности матрицы (– – – – изотермическое приближение)
Fig. 8. Coefficient of inhomogeneity of temperature distribution over the upper surface of the matrix (– – – – isothermal approximation)

Заключение. Предложенная модель для исследования теплоэлектрических процессов в светодиодной матрице основана на решении уравнения теплопроводности методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics и учитывает выражение для токов, протекающих через цепочки последовательно соединенных СИД. Установлено, что учет температурной зависимости прямого падения напряжения на СИД позволяет более точно определять значения максимальной температуры конструкции СМ, чем в случае приближения равенства токов, протекающих через ряды последовательно соединенных СИД. При этом с увеличением силы

тока возрастает разница между коэффициентами неравномерности профиля температуры по поверхности СМ, рассчитанными в рассматриваемых приближениях. Адекватность разработанной модели достигнута путем уточнения значения параметра модели – коэффициента теплообмена нижней поверхности платы с радиатором итерационном методом согласно экспериментальным данным, полученным для температуры перегрева *p*–*n*-перехода кристалла СИД.

Разработанная модель и полученные результаты расчетных исследований могут быть использованы разработчиками СМ для анализа и решения проблемы надежности, вызванной образованием мест локального разогрева в структуре СМ.

Литература

1. Improvement of thermal and optical behavior of multi-chip LEDs package / ***Kh. B. Abdelmlek, Z. Araoud, K. Charrada et al.*** // Case Stud. Therm. Eng. 2022. Vol. 39. Art. ID: 102395. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102395

2. ***Shirobokova T. A., Surinsky D. O., Egorov S. V.*** Modeling of led luminaires with optimal temperature operation of leds // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2131. Iss. 5. Art. No. 052093. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/05209

3. Исследование теплового режима в мощных светодиодных матрицах / ***А. В. Аладов, И. В. Белов, В. П. Валюхов и др.*** // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 3. С. 39–51. https://doi.org/10.18721/JPM.11304. – EDN: YBRQVN.

4. ***Schans M. van der, Yu J., Martin G.*** Digital luminaire design using LED digital twins – accuracy and reduced computation time: A Delphi4LED methodology // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 18. Art. No. 4979. https://doi.org/10.3390/en13184979

5. Dynamic prediction of optical and chromatic performances for a light-emitting diode array based on a thermal-electrical-spectral model / ***J. Fan, W. Chen, W. Yuan et al.*** // Opt. Express. 2020. Vol. 28. Iss. 9. P. 13921–13937. https://doi.org/10.1364/OE.387660

6. Energy efficiency of a LED lighting system using a Peltier module thermal converter / ***A. B. Halima, Z. Araoud, L. Canale et al.*** // Case Stud. Therm. Eng. 2022. Vol. 34. Art. ID: 101989. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101989

7. ***Shi D., Feng S., Zhang Y., Yang J.*** Thermal analysis of multiple light sources based on the superposition method // 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). Guilin: IEEE, 2014. P. 1–3. https://doi.org/10.1109/ICSICT.2014.7021444

8. ***Сергеев В. А., Ходаков А. М.*** Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 160 с. EDN: QMXKCV.

9. Efficient measurement of thermal coupling effects on multichip light-emitting diodes / ***H.-L. Lu, Y.-J. Lu, L.-H. Zhu et al.*** // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32. No. 12. P. 9280–9292. https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2653193

10. ***Górecki K., Ptak P.*** Modelling mutual thermal coupling in LED modules // Microelectronics International. 2015. Vol. 32. Iss. 3. P. 152–157. https://doi.org/10.1108/MI-01-2015-0013

11. ***Sergeev V. A., Khodakov A. M.*** Thermoelectric models of high-power bipolar semiconductor devices. II. Nonlinear model of LEDs // J. Commun. Technol. Electron. 2015. Vol. 60. P. 1328–1332. https://doi.org/10.1134/S1064226915080161

12. ***Сергеев В. А., Ходаков А. М., Фролов И. В.*** Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения температуры и плотности тока в гетероструктуре // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2020. Т. 12. № 3. С. 329–334. https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.329. – EDN: UHUUDJ.

13. Мощный светодиод ARPL-300W-BCB-7080-PW (7000 mA) // Arlight [Электронный ресурс]. URL: https://arlight.ru/catalog/product/018455/ (дата обращения: 28.08.2024).

14. DS-C15 LED by Bridgelux // GoPhotonics [Электронный ресурс]. URL: https://www.gophotonics.com/products/led-light-emitting-diodes/bridgelux/25-106-ds-c15 (дата обращения: 28.08.2024).

15. ***Sadeghi E., Bahrami M., Djilali N.*** Thermal spreading resistance of arbitrary-shape heat sources on a half-space: A unified approach // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2010. Vol. 33. No. 2. P. 267–277. https://doi.org/10.1109/TCAPT.2010.2043843

16. Прекращение поставок клея DM6030 после марта 2020 г. // Ostec: группа компаний [Электронный ресурс]. 20.05.2019. URL: https://ostec-materials.ru/news/ostec/prekrashchenie_postavok_kleya_dm6030_posle_marta_2020_g-2919/ (дата обращения: 20.11.2024).

Статья поступила в редакцию 29.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 18.03.2024 г.; принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Ходаков Александр Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники, опто- и наноэлектроники Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432011, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), ln23al@yandex.ru

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, доцент, и. о. директора Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432011, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), sva@ulstu.ru

Фролов Илья Владимирович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432011, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), ilya-frolov88@mail.ru

Радаев Олег Александрович – научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники, опто- и наноэлектроники Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432011, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), oleg.radaev.91@mail.ru

Зайцев Сергей Александрович – заместитель главного конструктора АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» (Россия, 432001, г. Ульяновск, ул. Крымова, 10а), sergei_zaicev@mail.ru

References

1. Abdelmlek Kh. B., Araoud Z., Charrada K., Zissis G., Canale L. Improvement of thermal and optical behavior of multi-chip LEDs package. *Case Stud. Therm. Eng.*, 2022, vol. 39, art. ID: 102395. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102395

2. Shirobokova T. A., Surinsky D. O., Egorov S. V. Modeling of led luminaires with optimal temperature operation of leds. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2131, iss. 5, art. no. 052093. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/05209

3. Aladov A. V., Belov I. V., Valyukhov V. P., Zakgeim A. L., Chernyakov A. E. A study of thermal regime in the high-power LED arrays. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskiye nauki = St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 39–51. (In Russian). https://doi.org/10.18721/JPM.11304. – EDN: YBRQVN.

4. Schans M. van der, Yu J., Martin G. Digital luminaire design using LED digital twins – accuracy and reduced computation time: A Delphi4LED methodology. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 18, art. no. 4979. https://doi.org/10.3390/en13184979

5. Fan J., Chen W., Yuan W., Fan X., Zhang G. Dynamic prediction of optical and chromatic performances for a light-emitting diode array based on a thermal-electrical-spectral model. *Opt. Express*, 2020, vol. 28, iss. 9, pp. 13921–13937. https://doi.org/10.1364/OE.387660

6. Halima A. B., Araoud Z., Canale L., Charrada K., Zissis G. Energy efficiency of a LED lighting system using a Peltier module thermal converter. *Case Stud. Therm. Eng.*, 2022, vol. 34, art. ID: 101989. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101989

7. Shi D., Feng S., Zhang Y., Yang J. Thermal analysis of multiple light sources based on the superposition method. *2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT).* Guilin, IEEE, 2014, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/ICSICT.2014.7021444

8. Sergeyev V. A., Khodakov A. M. *Nonlinear thermal models of semiconductor devices.* Ulyanovsk, UlSTU, 2012. 160 p. (In Russian). EDN: QMXKCV.

9. Lu H.-L., Lu Y.-J., Zhu L.-H., Lin Y., Guo Z.-Q., Liu T., Gao Y.-L., Chen G.-L., Chen Z. Efficient measurement of thermal coupling effects on multichip light-emitting diodes. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 12, pp. 9280–9292. https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2653193

10. Górecki K., Ptak P. Modelling mutual thermal coupling in LED modules. *Microelectronics International*, 2015, vol. 32, iss. 3, pp. 152–157. https://doi.org/10.1108/MI-01-2015-0013

11. Sergeev V. A., Khodakov A. M. Thermoelectric models of high-power bipolar semiconductor devices. II. Nonlinear model of LEDs. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2015, vol. 60, pp. 1328–1332. https://doi.org/10.1134/S1064226915080161

12. Sergeev V. A., Hodakov A. M., Frolov I. V. The model of degradation of InGaN/GaN LED during current tests taking into account the inhomogeneous distribution of temperature and current density in the heterostructure. *Radioelektronika, Nanosistemy, Informatsionnye tekhnologii = Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 329–334. (In Russian). https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.329. – EDN: UHUUDJ.

13. Powerful LED ARPL-300W-BCB-7080-PW (7000 mA) data sheet. *Arlight.* (In Russian). Available at: https://arlight.ru/catalog/product/018455/ (accessed: 28.08.2024).

14. DS-C15 LED by Bridgelux. *GoPhotonics.* Available at: https://www.gophotonics.com/products/led-light-emitting-diodes/bridgelux/25-106-ds-c15 (accessed: 28.08.2024).

15. Sadeghi E., Bahrami M., Djilali N. Thermal spreading resistance of arbitrary-shape heat sources on a half-space: A unified approach. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2010, vol. 33, no. 2, pp. 267–277. https://doi.org/10.1109/TCAPT.2010.2043843

16. DM6030 glue supply interruption after March 2020. Ostec: gruppa kompaniy. 20.05.2019. (In Russian). Available at: https://ostec-materials.ru/news/ostec/prekrashchenie_postavok_kleya_dm6030_posle_marta_2020_g-2919/ (accessed: 20.11.2024).

The article was submitted 29.02.2024; approved after reviewing 18.03.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Alexander M. Khodakov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Laboratory of Solid-State Electronics, Opto- and Nanoelectronics, Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 432011, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), ln23al@yandex.ru

Vyacheslav A. Sergeev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Acting Director, Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 432011, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), Head of the Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics Basic Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets st., 32), sva@ulstu.ru

Ilya V. Frolov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Scientific Work, Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 432011, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), ilya-frolov88@mail.ru

Oleg A. Radaev – Scientific Researcher of the Laboratory of Solid-State Electronics, Opto- and Nanoelectronics, Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 432011, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), oleg.radaev.91@mail.ru

Sergey A. Zaitsev – Deputy Chief Designer, Ulyanovsk Instrument Engineering Design Bureau JSC (Russia, 432001, Ulyanovsk, Krymov st., 10a), sergei_zaicev@mail.ru

Научная статья
УДК 621.382.3
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-763-771
EDN: EIYNWJ

Исследование зависимостей входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора от режимов работы в гигагерцовом диапазоне

А. И. Хлыбов, Д. В. Родионов, В. И. Егоркин, Е. Ю. Котляров, В. В. Лосев, Ю. А. Чаплыгин

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

dsd@miee.ru

Аннотация. В силовой электронике часто используется нормально-закрытый режим работы GaN-HEMT-транзистора, когда ток не течет при нулевом напряжении между затвором и истоком, а в канале ток модулируется приложением положительного смещения к электроду затвора. Измерение параметров GaN-HEMT-транзистора в гигагерцовом диапазоне имеет важное значение для получения физического представления о его работе, а также для разработки моделей больших и малых сигналов. В работе проведены экспериментальные исследования зависимостей входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора при разных режимах работы в гигагерцовом диапазоне. Предложена методика определения входной индуктивности. Приведены зависимости входной емкости и входного сопротивления от напряжений на затворе и стоке транзистора в диапазоне частот 5–20 ГГц. Полученные зависимости могут применяться при построении малосигнальной модели для нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора.

Ключевые слова: нитрид галлия, нормально-закрытый HEMT-транзистор, двумерный электронный газ, *S*-параметры, времяимпульсная рефлектометрия, емкость затвора

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты № 20-19-00521-П и № 23-19-00771).

Для цитирования: Исследование зависимостей входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора от режимов работы в гигагерцовом диапазоне / А. И. Хлыбов, Д. В. Родионов, В. И. Егоркин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 763–771. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-763-771. – EDN: EIYNWJ.

© А. И. Хлыбов, Д. В. Родионов, В. И. Егоркин, Е. Ю. Котляров, В. В. Лосев, Ю. А. Чаплыгин, 2024

Original article

Research of dependences of the normally-off GaN HEMT input parameters on the operating conditions at the GHz band

A. I. Khlybov, D. V. Rodionov, V. I. Egorkin, E. Yu. Kotlyarov, V. V. Losev, Yu. A. Chaplygin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

dsd@miee.ru

Abstract. Power electronics often requires normally-off operating condition of GaN HEMT when there is no current flow at zero gate-source voltage and the channel current is modulated by applying positive bias to gate terminal. Measurement of GaN HEMT parameters at the GHz band is of high importance for getting physical interpretation of its functioning, as well as for development of large-signal and small-signal models. In this work, experimental research of dependences of normally-off GaN HEMT input parameters at different operating conditions in GHz range is conducted. A procedure of line inductance measuring is proposed. The dependences of input capacitance and input resistance on gate voltage and drain voltage at the 5–20 GHz band have been given. The obtained dependences can be applied for designing small-signal model for normally-off GaN HEMT.

Keywords: gallium nitride, GaN, normally-off HEMT, 2-dimentional electron gas, *S*-parameters, time-domain reflectometry, gate capacitance

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (projects no. 20-19-00521-П and no. 23-19-00771).

For citation: Khlybov A. I., Rodionov D. V., Egorkin V. I., Kotlyarov E. Yu., Losev V. V., Chaplygin Yu. A. Research of dependences of the normally-off GaN HEMT input parameters on the operating conditions at the GHz band. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 763–771. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-763-771. – EDN: EIYNWJ.

Введение. Использование полупроводников с широкой запрещенной зоной в различных областях техники все более актуально. Благодаря своим уникальным свойствам нитрид галлия GaN и соединения на его основе (например, $Al_xGa_{1-x}N$) являются перспективными полупроводниками для следующего поколения мощных и высокочастотных устройств. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT-транзисторы) на основе гетероструктур AlGaN/GaN представляют собой устройства, принцип работы которых основан на наличии двумерного электронного газа (2DEG) [1], действующего как канал проводимости. Транзисторы в этом случае находятся в нормально-открытом режиме, т. е. между электродами истока и стока протекает ток даже при нулевом напряжении между затвором и истоком (U_{GS} = 0 В). Следовательно, ток в канале модулируется приложением отрицательного смещения к электроду затвора. Однако во многих приложениях, в частности в силовой электронике, часто используется нормально-закрытый режим работы, когда ток не течет при нулевом напряжении между затвором

и истоком, а в канале ток модулируется приложением положительного смещения к электроду затвора. Такие транзисторы называются нормально-закрытыми. Ввиду высокой подвижности электронов в 2DEG (для GaN более 1000 см^2/(В·с)) и высокой скорости насыщения (для GaN $v_s \simeq 3 \cdot 10^7$ см/с) HEMT-транзисторы на GaN находят все более широкое применение в мощных СВЧ-устройствах [2].

Измерение параметров GaN-HEMT-транзистора в гигагерцовом диапазоне имеет важное значение для получения физического представления о его работе, а также для разработки моделей больших и малых сигналов. В общем случае любые параметры транзистора могут иметь частотную зависимость. Однако наиболее заметно это проявляется с емкостными параметрами, например такими, как емкость затвор-исток и затвор-сток, так как емкость является функцией диэлектрической проницаемости, которая, как правило, частотно зависима. Традиционные методы определения емкости транзистора заключаются в применении квазистатических или высокочастотных C–V-измерений емкости, но даже при так называемых «высокочастотных» C–V-измерениях, как правило, используется общепринятая частота не более 1 МГц. Емкость, измеренная такими методами, может отличаться от емкости на гигагерцовых частотах, что приводит к некорректному описанию модели поведения транзистора, когда устройство работает на высоких частотах (например, более 1 ГГц). Существуют методы определения параметров транзисторов на рабочих частотах, лежащих в гигагерцовом диапазоне, например рефлектометрический метод [3], основанный на анализе воздействия пикосекудных импульсов на объект исследования, или экстракция характеристик транзистора из измеренных значений *S*-параметров [4, 5].

Цель настоящей работы – проведение экспериментальных исследований входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора при разных режимах работы в гигагерцовом диапазоне для определения зависимостей входной емкости и входного сопротивления от напряжений на затворе и стоке транзистора в диапазоне частот 5–20 ГГц.

Методика исследования. Определение зависимостей входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора проводили путем измерения *S*-параметров, а именно параметра S_{11}, из которого рассчитывали входной импеданс:

$$Z_{in} = \frac{Z_0(1+S_{11})}{1-S_{11}}. \qquad (1)$$

Здесь Z_{in} – входной импеданс; $Z_0 = 50$ Ом импеданс линии передачи.

Выражение для входного импеданса транзистора имеет вид

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in}, \qquad (2)$$

где R_{in} – активная часть входного импеданса; jX_{in} – реактивная часть.

Выразим реальную и мнимую части входного импеданса через реальную и мнимую части параметра S_{11}:

$$S_{11} = S_{\mathrm{Re}} + jS_{\mathrm{Im}}. \qquad (3)$$

Подставляя (3) в выражение (1) и выделяя реальную и мнимую части, получаем следующее выражение для входного импеданса:

$$Z_{in} = \frac{Z_0(1-|S_{11}|^2)}{1+|S_{11}|^2-2S_{\mathrm{Re}}} + j\frac{2Z_0 S_{\mathrm{Im}}}{1+|S_{11}|^2-2S_{\mathrm{Re}}} = R_{in} + jX_{in}, \quad (4)$$

где $|S_{11}|^2 = S_{\mathrm{Re}}^2 + S_{\mathrm{Im}}^2$.

Принимая во внимание, что

$$jX_{in} = j\omega L_{in} + \frac{1}{j\omega C_{in}} = j(\omega L_{in} - \frac{1}{\omega C_{in}}), \quad (5)$$

получаем

$$X_{in} = \omega L_{in} - \frac{1}{\omega C_{in}}, \quad (6)$$

где L_{in} – входная индуктивность; C_{in} – входная емкость.

Производная от X_{in} по переменной ω имеет вид

$$\frac{dX_{in}}{d\omega} = L_{in} + \frac{1}{\omega^2 C_{in}}. \quad (7)$$

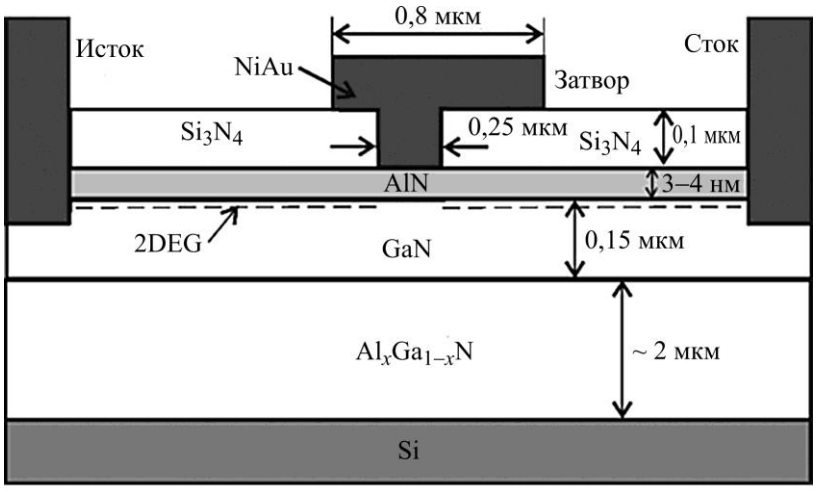
Как видно из выражения (7), при достаточно больших частотах выражение $\frac{1}{\omega^2 C_{in}}$ стремится к нулю, а производная от X_{in} – к значению входной индуктивности, так как индуктивность определяется в основном конструкцией транзистора и соответственно не зависит от частоты входного сигнала. Исходя из этого выражение для входной емкости от частоты, полученное согласно (6), будет иметь вид

$$C_{in}(\omega) = \frac{1}{\omega^2 L_{in} - \omega X_{in}(\omega)}$$

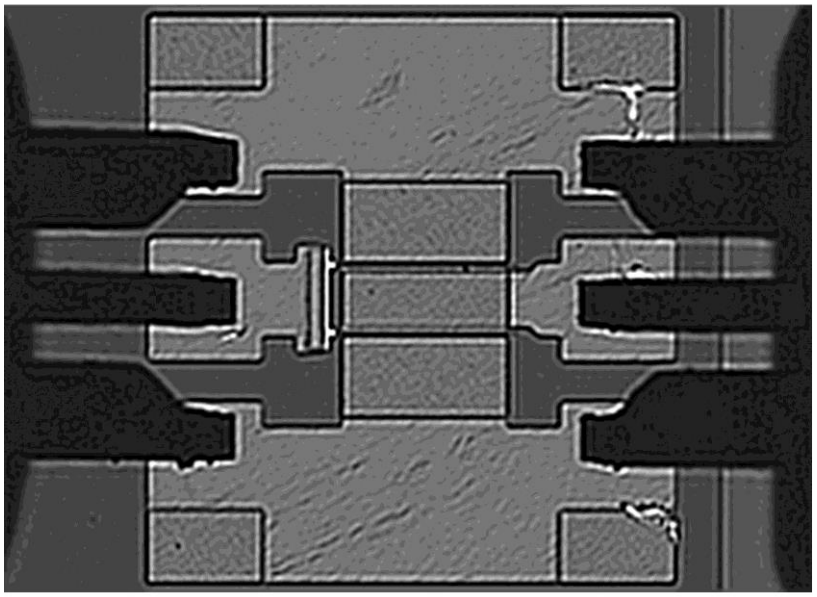
или

$$C_{in}(f) = \frac{1}{2\pi f(2\pi f L_{in} - X_{in}(f))}. \quad (8)$$

Эксперимент. Экспериментальные исследования входных параметров проводили на тестовом образце нормально-закрытого интегрального GaN-HEMT-транзистора, изготовленного на кремниевой подложке. Утоненный кристалл толщиной 100 мкм со структурой транзистора смонтирован на медной пластине с помощью тонкого слоя теплопроводящего материала. Структура транзистора с указанием основных слоев и их толщин, а также его топология приведены на рис. 1. Транзистор имеет два параллельно соединенных затвора с общей шириной W = 160 мкм. Геометрия контактных площадок позволяет измерять S-параметры непосредственно на кристалле с использованием СВЧ-зондов. Исследования проводили при работе транзистора в непрерывном режиме. Экспериментальные исследования включали в себя измерения выходных и передаточных ВАХ, S-параметров для разных значений напряжений затвор-исток (U_{GS}) и сток-исток (U_{DS}). Выходные ВАХ транзистора приведены на рис. 2.



а



б

Рис. 1. Структура (*а*) и топология (*б*) нормально-закрытого интегрального GaN-HEMT-транзистора (W = 160 мкм, длина затвора L_G = 0,25 мкм, расстояние затвор-исток L_{GS} = 1,5 мкм, расстояние затвор-сток L_{GD} = 4 мкм)
Fig. 1. Normally-off GaN HEMT integrated transistor cross-section (*a*) and layout (*b*) (gate width W = 160 μm, gate length L_G = 0.25 μm, gate-source distance L_{GS} = 1.5 μm, gate-drain distance L_{GD} = 4 μm)

В соответствии с изложенной методикой определены значения входной индуктивности и входной емкости. Зависимости производной мнимой части входного импеданса X_{in} от частоты для различных значений напряжения на стоке транзистора, полученные из вычисленных значений X_{in}, показаны на рис. 3. Из приведенных зависимостей на рис. 3 видно, что с увеличением частоты они стремятся к некоторой величине, фактически являющейся входной индуктивностью L_{in}. Для исследуемого транзистора $L_{in} \approx 165$ пГн.

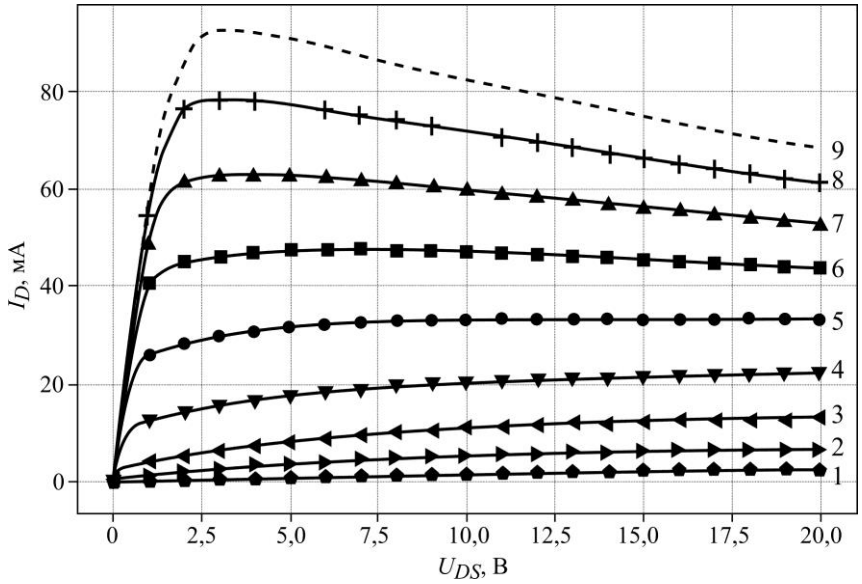


Рис. 2. Выходные ВАХ квазинормально-закрытого GaN-транзистора (W = 160 мкм, L_G = 0,25 мкм) при разных значениях напряжения затвор-исток U_{GS}: *1* – –0,4 В; *2* – –0,2 В; *3* – 0 В; *4* – 0,2 В; *5* – 0,4 В; *6* – 0,6 В; *7* – 0,8 В; *8* – 1,0 В; *9* – 1,2 В

Fig. 2. Output IV-curves of the quasi normally-off GaN transistor (W = 160 μm, L_G = 0.25 μm) at different values of U_{GS}: *1* – –0.4 V; *2* – –0.2 V; *3* – 0 V; *4* – 0.2 V; *5* – 0.4 V; *6* – 0.6 V; *7* – 0.8 V; *8* – 1.0 V; *9* – 1.2 V

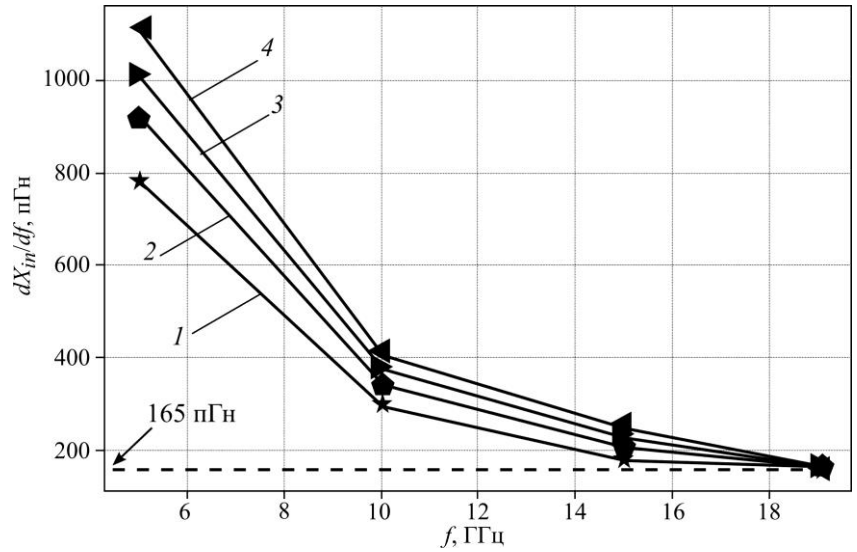


Рис. 3. Производная мнимой части входного импеданса при положительном смещении затвор-исток (U_{GS} = 0,8 В) для разных значений частоты и напряжения сток-исток U_{DS}: *1* – 5 В; *2* – 10 В; *3* – 15 В; *4* – 20 В

Fig. 3. The derivative of the input impedance imagine part as function of operating frequency and drain-source voltage for positive gate-source voltage U_{DS} (U_{GS} = 0.8 V): *1* – 5 V; *2* – 10 V; *3* – 15 V; *4* – 20 V

Входная емкость рассчитана из выражения (8) после определения индуктивности. Зависимости входной емкости от напряжения сток-исток для разных значений частоты входного сигнала при положительном смещении затвор-исток U_{GS} = 0,8 В приведены на рис. 4.

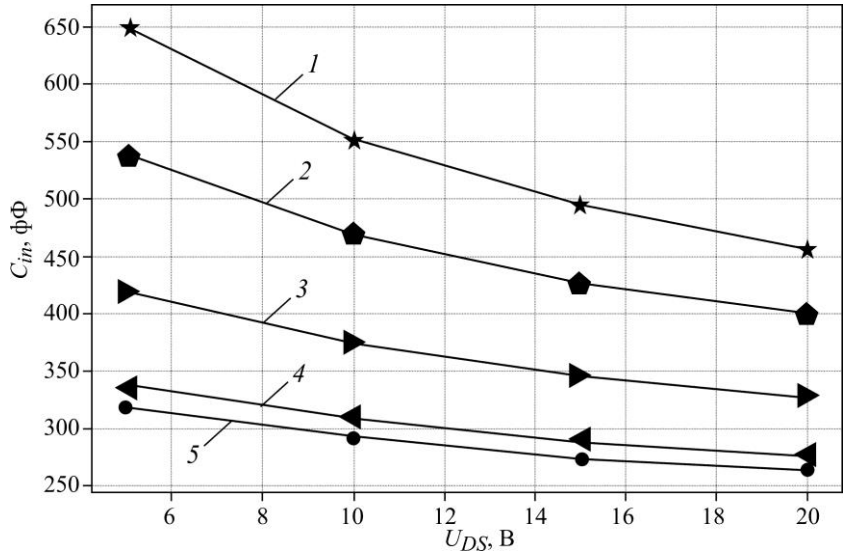


Рис. 4. Зависимость входной емкости от напряжения сток-исток при положительном смещении затвор-исток (U_{GS} = 0,8 В) для разных значений частоты *f*: *1* – 5 ГГц; *2* – 10 ГГц; *3* – 15 ГГц; *4* – 19 ГГц; *5* – 20 ГГц

Fig. 4. Input capacitance as function of drain-source voltage and operating frequency *f* for positive gate-source voltage (U_{GS} = 0.8 V): *1* – 5 GHz; *2* – 10 GHz; *3* – 15 GHz; *4* – 19 GHz; *5* – 20 GHz

Из выражения (4) рассчитано входное сопротивление для различных значений напряжения сток-исток и частоты входного сигнала при положительном смещении затвор-исток. Полученные зависимости приведены на рис. 5.

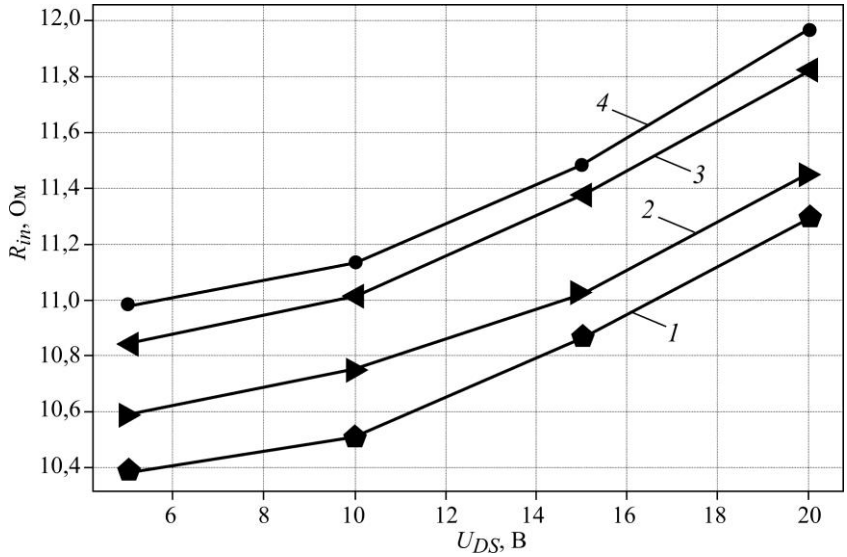


Рис. 5. Зависимость входного сопротивления от напряжения сток-исток при положительном смещении затвор-исток (U_{GS} = 0,8 В) для разных значений частоты *f*: *1* – 10 ГГц; *2* – 15 ГГц; *3* – 19 ГГц; *4* – 20 ГГц

Fig. 5. Input resistance as function of drain-source voltage and frequency for positive gate-source voltage (U_{GS} = 0.8 V): *1* – 10 GHz; *2* – 15 GHz; *3* – 19 GHz; *4* – 20 GHz

Из полученных зависимостей следует, что с увеличением напряжения на стоке от 5 до 20 В входная емкость уменьшается на 13–30 % (минимальное значение соответствует частоте 20 ГГц, а максимальное – частоте 5 ГГц). Входное сопротивление с ростом напряжения на стоке увеличивается примерно на 9 % при любой частоте.

При изменении частоты от 5 до 20 ГГц и фиксированном напряжении на стоке входная емкость также уменьшается на 42–50 % (минимальное значение соответствует напряжению на стоке 20 В, а максимальное – напряжению 5 В). При изменении частоты входное сопротивление также уменьшается примерно на 6 % при любом напряжении на стоке.

Заключение. Полученные результаты экспериментальных исследований зависимостей входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора при разных режимах работы в гигагерцовом диапазоне с помощью предложенной методики определения входной индуктивности могут быть использованы при построении малосигнальной модели для нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора.

Литература

1. ***Asif Khan M., Kuznia J. N., Bhattarai A. R., Olson D. T.*** Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 62. Iss. 15. P. 1786–1787. https://doi.org/10.1063/1.109549

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

3. СВЧ-рефлектометрия *n*-МОП КНИ-транзисторов / ***В. П. Тимошенков, А. И. Хлыбов, Д. В. Родионов и др.*** // Наноиндустрия. 2020. № S96-1. С. 353–355. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.353.355. – EDN: QNAWSL.

4. ***Коколов А. А., Бабак Л. И.*** Методика построения малосигнальной модели СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов // Доклады ТУСУР. 2010. № 2-1 (22). С. 153–156. EDN: NQVQBH.

5. ***Su J.-G., Wong Sh.-Ch., Chang Ch.-Y., Huang T.-Y.*** The extraction of MOSFET gate capacitance from S-parameter measurements // Solid-State Electron. 2002. Vol. 46. Iss. 8. P. 1163–1167. https://doi.org/10.1016/S0038-1101(02)00022-9

Статья поступила в редакцию 20.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 05.07.2024 г.;
принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Хлыбов Александр Иванович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alex1818@yandex.ru

Родионов Денис Владимирович – ведущий инженер Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), denis.rodionov@gmail.com

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

Котляров Евгений Юрьевич – аспирант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ekotlyarov86@gmail.com

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, доцент, директор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dsd@miee.ru

Чаплыгин Юрий Александрович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева, президент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), president@miet.ru

References

1. Asif Khan M., Kuznia J. N., Bhattarai A. R., Olson D. T. Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, vol. 62, iss. 15, pp. 1786–1787. https://doi.org/10.1063/1.109549

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

3. Timoshenkov V. P., Khlybov A. I., Rodionov D. V., Shelepin N. A., Seletskiy A. V. Microwave reflectometry of *n*-MOS SOI transistors. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2020, no. S96-1, pp. 353–355. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.353.355. – EDN: QNAWSL.

4. Kokolov A. A., Babak L. I. A technique for extraction of HEMT small signal model. *Doklady TUSUR = Proceedings of the TUSUR University*, 2010, no. 2-1 (22), pp. 153–156. (In Russian). EDN: NQVQBH.

5. Su J.-G., Wong Sh.-Ch., Chang Ch.-Y., Huang T.-Y. The extraction of MOSFET gate capacitance from S-parameter measurements. *Solid-State Electron.*, 2002, vol. 46, iss. 8, pp. 1163–1167. https://doi.org/10.1016/S0038-1101(02)00022-9

The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 05.07.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Alexander I. Khlybov – Cand. Sci. (Eng.), Researcher of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alex1818@yandex.ru

Denis V. Rodionov – Senior Engineer of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), denis.rodionov@gmail.com

Vladimir I. Egorkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), egorkinvi1962@mail.ru

Evgeny Yu. Kotlyarov – PhD student of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ekotlyarov86@gmail.com

Vladimir V. Losev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dsd@miee.ru

Yury A. Chaplygin – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Leader of the Institute of Integrated Electronics, President, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), president@miet.ru

Научная статья
УДК 621.382.3
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-772-786
EDN: EFLYTV

Высокочастотная модель транзистора со статической индукцией

Ю. Н. Максименко[1], К. О. Петросянц[2,3], Д. С. Силкин[2,3], 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. Физико-математическая модель транзистора со статической индукцией дает возможность проводить расчет основных ВАХ и анализ конструкции приборов для статического режима при биполярном режиме работы транзистора, а также позволяет понять возможности улучшения конструкции кристалла. Однако данная модель не обеспечивает анализ работы приборов со статической индукцией на высоких частотах, без которого нельзя создать конструкцию прибора с оптимальными параметрами. В работе представлена модель приборов со статической индукцией для анализа их работы на высоких частотах. Предложены пути по улучшению конструкции кристалла, позволяющие увеличить скорость переключения более чем на порядок. С применением представленной модели проведен анализ высокочастотных свойств транзистора КП926. Установлено, что в конструкцию кристалла можно внести изменения, приводящие к увеличению рабочей частоты прибора более чем на порядок при сохранении основных ВАХ.

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

Для цитирования: Максименко Ю. Н., Петросянц К. О., Силкин Д. С., Грабежова В. К. Высокочастотная модель транзистора со статической индукцией // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 772–786. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-772-786. – EDN: EFLYTV.

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

Original article

High-frequency transistor model with static induction

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

[1]Vega Biomicroelectronic 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. Physical and mathematical model of a transistor with static induction makes it possible to calculate the main current-voltage characteristics and to analyze the design of devices for static mode in bipolar operation of transistor, and also to understand the possibilities of crystal design improvement. However, this model does not allow analyzing the operation of devices with static induction at high frequencies, without which it is impossible to create a device design with optimal parameters. In this work, a model of devices with static induction for their operation analysis at high frequencies is presented. The ways of crystal design improvement allowing an increase in switching rate by more than an order of magnitude are proposed. Using the developed model, an analysis of the operation of the KP926 transistor at high frequencies was carried out. It has been established that it is possible to make changes to the crystal design that will lead to an increase in the operating frequency of the device by more than an order of magnitude while maintaining the main current-voltage characteristics.

Keywords: transistor with static induction, physical and mathematical model, transistor resistance in open state, performance

For citation: Maksimenko Yu. N., Petrosyants K. O., Silkin D. S., Grabezhova V. K. High-frequency transistor model with static induction. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 772–786. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-772-786. – EDN: EFLYTV.

Введение. Транзистор со статической индукцией КП926 – мощный высоковольтный прибор, работающий одновременно как в полевом, так и биполярном режимах [1]. Запирание тока, который протекает через прибор и на пути которого нет *p*–*n*-переходов, 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 статических потерь и работать на частотах ~ 1 МГц при управлении токами в несколько десятков ампер. Ключи с такими параметрами востребованы, например, в схемах питания мощных электродвигателей, системах ускоренной зарядки электромобилей, т. е. там, где важно получить оптимальное соотношение высокой управляемой мощности и частоты работы устройства. Сравнительный анализ показывает, что по сопротивлению открытого канала при-

боры со статической индукцией превосходят многие типы силовых ключей, в том числе биполярные транзисторы с изолированным затвором [2], чем обусловлены меньшие потери мощности и повышенная энергоэффективность этих приборов [3], а также современных полевых транзисторов, выполненных на широкозонных материалах SiC и GaN [4].

Несмотря на свои уникальные ключевые характеристики, транзистор КП926 имеет существенный недостаток – при работе на предельных токах (10–16 А) у транзистора при выключении увеличивается время рассасывания неосновных носителей до 1,5 мкс. Данное обстоятельство создает проблемы при построении радиоэлектронных устройств и ограничивает его высокочастотные свойства.

В настоящей работе рассматривается модель приборов со статической индукцией, позволяющая проводить анализ их работы на высоких частотах. С помощью данной модели проводится анализ высокочастотных свойств транзистора КП926.

Конструкция кристалла транзистора КП926. В работе [5] предложена модель, позволяющая проводить анализ зависимости основных ВАХ приборов со статической индукцией от конструктивных и электрофизических параметров. Анализ ВАХ транзистора КП926 с использованием этой модели показал, что путем изменения некоторых параметров конструкции можно увеличить коэффициент усиления по току более чем в два раза. Это приводит к снижению мощности управления и, соответственно, к повышению быстродействия. Однако данная модель не позволяет проводить анализ прибора при работе на высоких частотах, а без такого анализа нельзя создать оптимальную конструкцию. Анализ работы высоковольтных ключевых транзисторов со статической индукцией, таких как КП926, КТ9154, КП942 и т. д., на высоких частотах показал, что при выключении транзистора ток стока снижается на 60 %, а затем выключение затягивается до 1,5 мкс.

Для того чтобы понять особенности работы транзисторов на высоких частотах, рассмотрим конструкцию кристалла транзистора КП926. Топология кристалла КП926 выполнена по типу Overlay. Длина истока 242 мкм. Всего истоков 5100 шт., они включены параллельно, их общая длина составляет 123,42 см [1]. Расстояние между краями истоков 78 мкм, и здесь находится металлизация затвора (рис. 1).

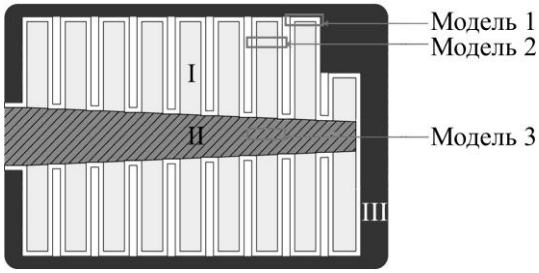


Рис. 1. Топология транзистора КП926 (вид сверху): I – область с металлизацией затвора на торцах истоков; II – область с отсутствием металлизации затвора на торцах истоков; III – p^+-область затвора под площадкой затвора и на периферии; модели 1–3 – участки, где емкости принципиально различаются

Fig. 1. KP926 transistors topology (top view): I – the area where there is a metallization of the gate from the ends of the sources; II – the area where there is no metallization of the gate from the ends of the sources; III – the p^+ shutter area under the shutter pad and on the periphery; models 1–3 – areas where capacities are fundamentally different

На высоких частотах области I–III (см. рис. 1) по-разному влияют на быстродействие прибора. В биполярном режиме работы ток затвора подводится к вертикальному каналу транзистора следующим образом.

В области I ток затвора течет по металлизации и от торцов истоков, далее по p^+-области с двух сторон к центру истока. Если сопротивление p^+-области большое и падение напряжения по этой области соизмеримо с напряжением открывания p–n-перехода (0,7 В), то с повышением частоты выключение истока в центральной части будет запаздывать. В этих местах

возникает перегрев кристалла, образуется горячее пятно, что приводит к пробою между истоком и затвором. В транзисторе КП926 сопротивление этих областей мало и проблем с пробоем не наблюдается. В транзисторах со статической индукцией эта проблема существует [6]. В области II ток затвора течет по металлизации, затем по широкой (78 мкм) p^+-области, далее так же, как в области I. Область III (p^+-область затвора по периферии) имеет ширину 350 мкм, размер площадки под затвор 1000 × 700 мкм, что существенно больше толщины базы (38 мкм), и здесь нет тока стока, поэтому эти области работают как обычный диод. Общая площадь области III (назовем ее паразитной) составляет 40 % от активной части кристалла.

Рассмотрим механизм ввода и вывода неосновных носителей из каналов транзистора и из областей под площадкой затвора и на периферии. На рис. 2 показан поперечный разрез кристалла КП926.

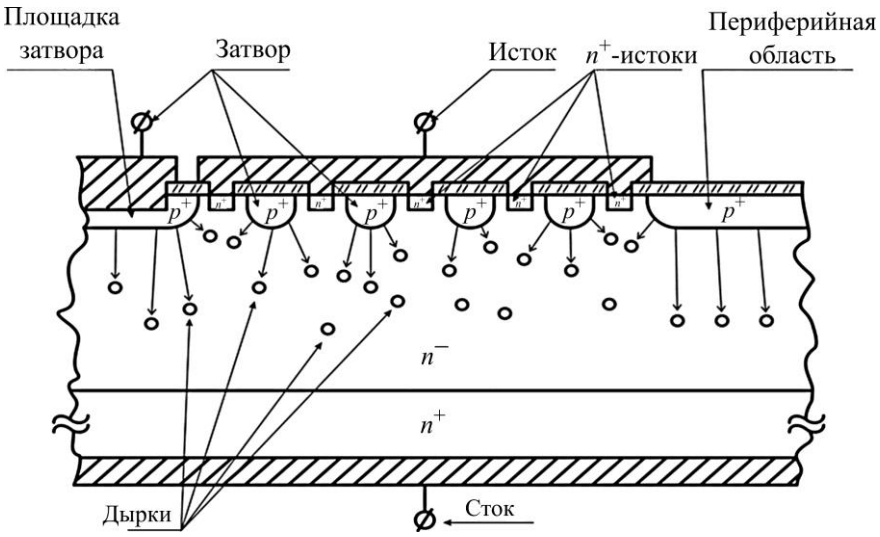


Рис. 2. Поперечный разрез кристалла транзистора КП926
Fig. 2. Cross section of the crystal of the KP926 transistor

При вводе транзистора в биполярный режим в затвор вкачивается ток и неосновные носители (дырки) впрыскиваются в каналы (см. рис 2), а также под площадку затвора и на периферии. В каналах создается положительный заряд, который вытягивает электроны из истока. Образуется электронно-дырочная плазма, и сопротивление транзистора уменьшается почти на три порядка. Время включения определяется перезарядкой барьерных емкостей ($C_{ЗИ}$ и $C_{ЗС}$) и диффузионной емкости, которые зависят от площади затвора.

Для выключения транзистора на затвор подается отрицательное напряжение. Инжекция дырок прекращается, создается поле, которое вытягивает дырки в затвор. Пока транзистор открыт (области пространственного заряда не перекрывают канал), из истока навстречу дыркам продолжают двигаться электроны и происходит активная их рекомбинация. После выведения из канала всех неосновных носителей в нем образуется область пространственного заряда, которая его перекрывает, но в нагрузке продолжает течь ток по цепи затвор-сток до тех пор, пока все неосновные носители не удалятся из высокоомной области стока. Время их вывода определяет задержку выключения. Чем

меньше заряд, накопленный неосновными носителями, и чем выше обратный импульсный ток затвора, тем меньше время задержки выключения прибора.

На рис. 3, *а* приведена эквивалентная схема замещения статического индукционного транзистора для полевого режима работы [7].

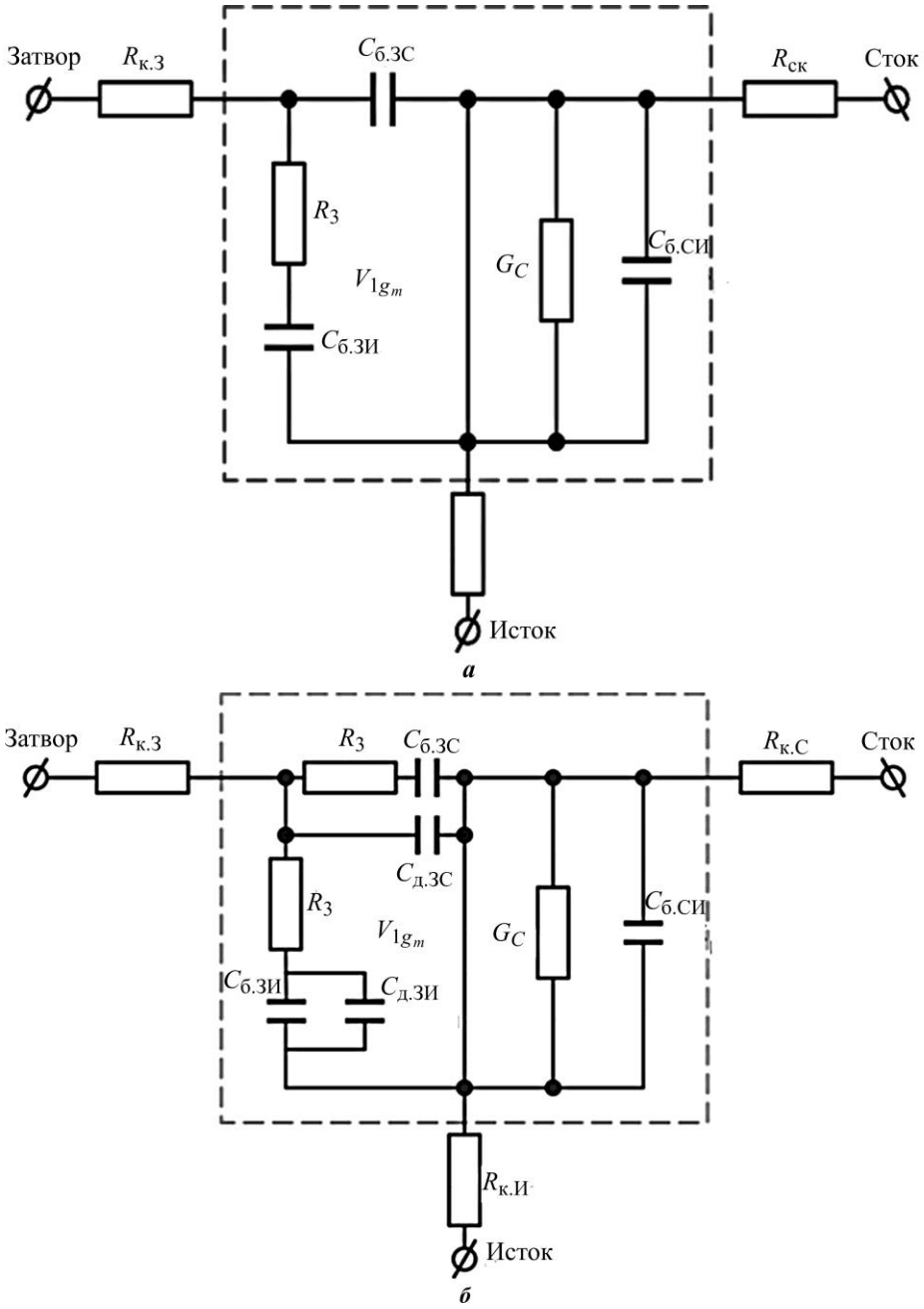


Рис. 3. Эквивалентные схемы замещения статического индукционного транзистора при работе в полевом (*а*) и биполярно-полевом (*б*) режимах: $C_{д.ЗИ}$ – диффузионная емкость затвор-исток; $C_{д.ЗС}$ – диффузионная емкость затвор-сток; $R_З$ – сопротивление p^+-области от металлизации затвора до середины истока, $R_{к.З}$, $R_{к.С}$, $R_{к.И}$ – сопротивления выводов корпуса

Fig. 3. Equivalent circuits of a static induction transistor when operating in field (*a*) and bipolar field (*b*) modes: $C_{д.ЗИ}$ – gate-source diffusion capacitance; $C_{д.ЗС}$ – gate-drain diffusion capacitance; $R_З$ – resistance of the p^+ region from the gate metallization to the middle of the source, $R_{к.З}$, $R_{к.С}$, $R_{к.И}$ – package lead resistances

Согласно эквивалентной схеме замещения максимальная частота генерации определяется выражением

$$F_{\max} = \frac{g_m}{2\pi \cdot \left(C_{\text{б. ЗИ}} + C_{\text{б. ЗС}} \right)}, \quad (1)$$

где g_m – крутизна характеристики внутреннего транзистора (на рис. 3 обозначена как G_C); $C_{\text{б. ЗИ}}$ – барьерная емкость затвор-исток; $C_{\text{б. ЗС}}$ – барьерная емкость затвор-сток.

Формула (1) показывает, что для повышения высокочастотных свойств в полевом режиме работы прибора необходимо увеличить крутизну характеристики и уменьшить емкости $C_{\text{б. ЗИ}}$ и $C_{\text{б. ЗС}}$. Емкость $C_{\text{б. СИ}}$ не оказывает влияния на времена переключения. Авторы работы [7], рассматривая конструкцию транзистора с планарным затвором, считают, что «внутреннее» сопротивление затвора намного меньше внешнего, и не учитывают его. Однако в конструкциях со скрытым затвором внутреннее сопротивление характеризуется большим значением. С повышением частоты падение напряжения на нем растет, напряжение, приложенное к управляющему *p*–*n*-переходу, уменьшается, и коэффициент усиления с ростом частоты падает. Аналогично происходит и в конструкции с планарным затвором, построенной по типу Overlay, если сопротивление p^+-области вдоль зубца истока большое.

При работе транзистора в биполярно-полевом режиме в эквивалентную схему необходимо добавить диффузионную емкость между затвором и стоком, а также затвором и истоком, которая возникает при переводе прибора в биполярный режим путем впрыскивания неосновных носителей в канал и базу. Данную емкость следует разбить на две: емкость в канале и емкость под площадкой затвора и на периферии, так как механизм их работы на высоких частотах разный.

На рис. 3, *б* приведена эквивалентная схема замещения транзистора с учетом его работы в биполярном режиме.

Для транзистора КП926 $R_З << R_г$ (сопротивление генератора, подающего импульсы управления на транзистор), и $R_З$ не оказывает влияния на частотные свойства прибора. Тогда выражение (1) примет вид

$$F_{\max} = \frac{g_m}{2\pi \cdot \left(C_{\text{б. ЗИ}} + C_{\text{б. ЗС}} + C_{\text{д. ЗИ}} + C_{\text{д. ЗС}} \right)}.$$

Построение трехмерной модели транзистора. Поскольку у транзистора КП926 $R_З << R_г$, динамические характеристики определяются только паразитными емкостями в структуре транзистора и $R_г$, для их расчета требуется построение трехмерной модели. Создание полноразмерной трехмерной модели 1-к-1 кристалла, состоящего из нескольких тысяч ячеек, не представляется возможным. Стандартной практикой для таких случаев является разработка трехмерной модели одной ячейки с последующим масштабированием на коэффициент площади. Однако эта методика применяется только в тех случаях, когда можно выделить элементарный объем, в котором учтены все физические эффекты, влияющие на моделируемые величины. В рассматриваемом случае на топологии можно выделить участки (модели 1–3), где емкости принципиально различаются (см. рис.1).

Модель 1 (рис. 4, *а*) описывает участок, примыкающий к контакту затвора (длина области металлизации затвора не в масштабе). Ее основная задача – определить, как площадь затвора на периферии и под площадкой затвора будет влиять на динамические характеристики. В этой модели берется одна «полоска» истока и к ней с одной стороны подводится большая площадка затвора с металлизацией (область III на рис. 1). Длина площадки затвора – подгоночный параметр, она выбирается такой, чтобы при умножении на число участков (18, см. рис. 1) получалась полная площадь области III на рис. 1, равная 10,05 мм^2.

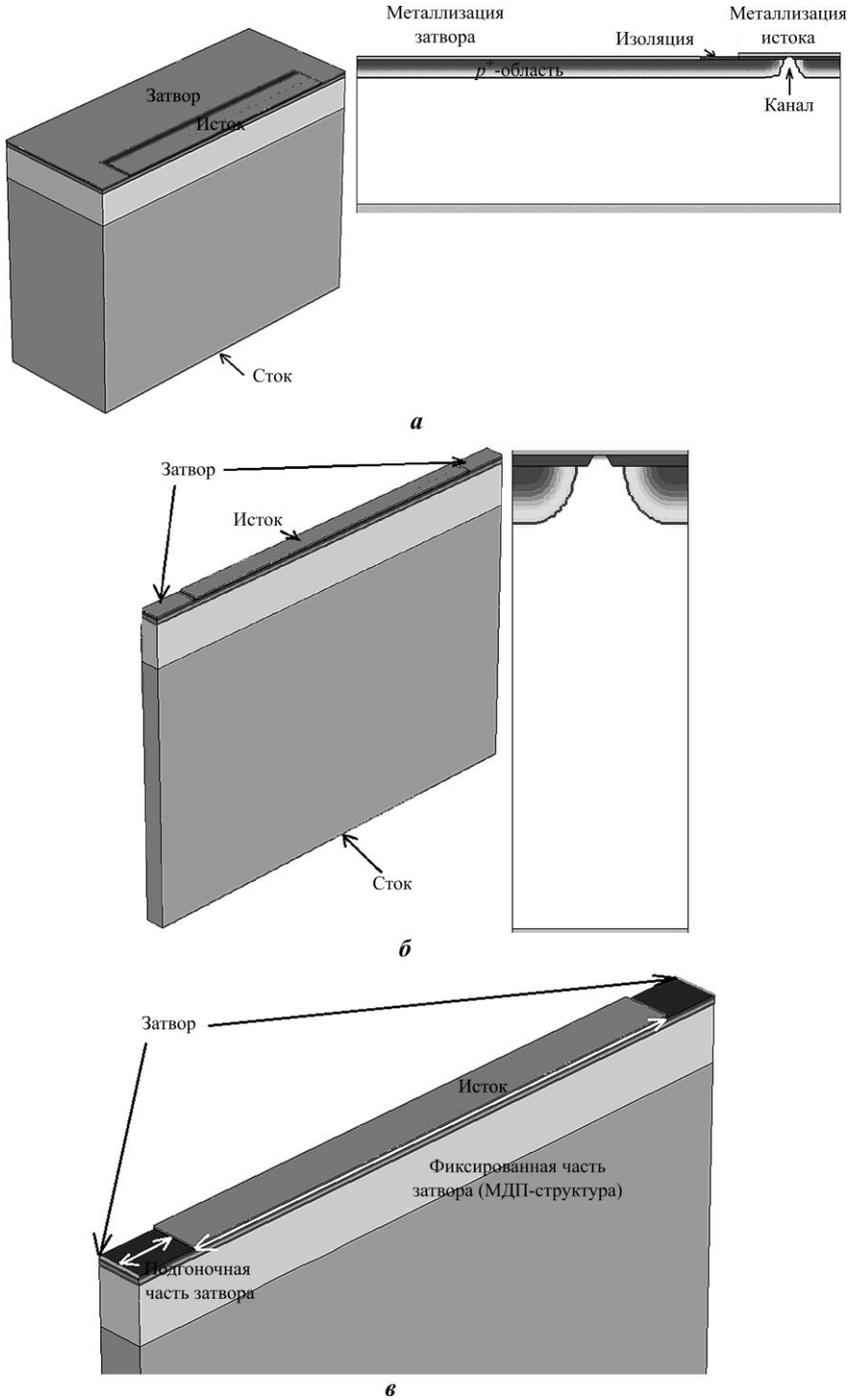


Рис. 4. Общий вид и поперечное сечение (эпитаксиальная часть выше подложки) модели 1 с металлизацией затвора (*а*); модель 2 с одним истоком и прилегающей к нему областью затворов (*б*); модель 3 с покрытой металлом областью и полупроводниковыми областями на торцах с частью p^+-слоя, по которой должны пройти носители заряда, прежде чем попадут в канал (*в*)

Fig. 4. General view and cross section (the epitaxial part is above the substrate, the length of the gate metallization area is not scaled) of model 1, including the metallization of the shutter (*a*); model 2, which includes one source and adjacent gate areas (*b*); model 3 with the metal-coated region and the semiconductor regions at the ends representing that part of the p^+ layer through which charge carriers must pass before they enter the channel (*c*)

Модель 2 (рис. 4, *б*) описывает структуру в области I на рис. 1. Модель включает в себя одну полоску истока, к которой с торцов подходят контакты затвора. Ширина p^+-областей, примыкающих к истоку, а также ширина областей металлизации затвора взяты равными половине от их ширины по топологии, чтобы при умножении давать площадь, равную площади структуры, не вошедшей в области II и III на рис. 1. В поперечном сечении эта модель дает структуру, использованную для моделирования статических характеристик в работе [5].

Модель 3 (рис. 4, *в*) предназначена для моделирования влияния на динамические характеристики области II на рис. 1. Эта модель в целом аналогична модели 2, но вся поверхность полупроводника закрыта диэлектриком, на котором расположена металлизация истока. Эта модель имеет две основные задачи: во-первых, она моделирует влияние емкости, образованной структурой металл истока – изолирующий диэлектрик – p^+-слой затвора в области II на рис. 1, во-вторых, она должна моделировать распределенную емкость p^+–n-перехода. Для этого длина затвора в модели принимается в качестве подгоночного параметра и будет варьироваться, чтобы определить, насколько значимым является данный эффект.

Подгоночная часть затвора не в масштабе. Угол 90° не учитывается. Коэффициенты площади в модели 3 задаются отдельно для каждого контакта. Для затвора коэффициент равен 8, так как в модели две точки подключения контакта затвора к структуре, а на топологии их 16. Для стока и истока коэффициент площади равен 530 по числу полос истока в области III на рис. 1.

Для упрощения расчетов в модели 2 коэффициент площади принят равным 5100 по полному числу стоков и истоков. Таким образом, эта модель представляет собой идеализированную версию транзистора без учета контактных площадок. В модели 1 коэффициент площади истока, так же как и модели 2, равен 5100, а коэффициенты площади вычисляются как отношение площади затвора и стока в приборе и в модели. Для затвора коэффициент площади принят равным 36, коэффициент стока – 114, при этом ширина металлизации затвора равна 525,25 мкм. Это значение принято как компромисс между необходимостью показать влияние этой области на работу прибора и приемлемым значением расчетной сетки. Во всех моделях применяются транзисторная структура и набор моделей физических эффектов, приведенные в [5].

При анализе результатов моделирования следует учитывать, что раздельная симуляция работы прибора с помощью моделей 1–3 не дает точных результатов расчета динамических параметров прибора, а лишь позволяет качественно оценить влияние отдельных конструктивных решений на его характеристики. На практике управляющий ток затвора будет распределяться между всеми участками структуры сообразно соотношению их проводимостей, а изменение напряжения между стоком и истоком будет меняться пропорционально сумме проводимостей каналов, напряжение падения каждого из которых определяется долей тока затвора, накачивающего канал избыточными носителями. Имеющиеся вычислительные и программные возможности не позволяют просчитать этот процесс.

Моделирование динамических характеристик. ***Определение динамических параметров*****.** Согласно полученной схеме измерения и эпюрам напряжений, измерение времени включения и выключения происходит по анализу осциллограммы напряжений. На затвор подается импульс напряжения, соответствующий току 10 А, время включения определяется как время, за которое напряжение стока упадет до минимального значения (рис. 5). Сток нагружен резистором сопротивлением 30 Ом.

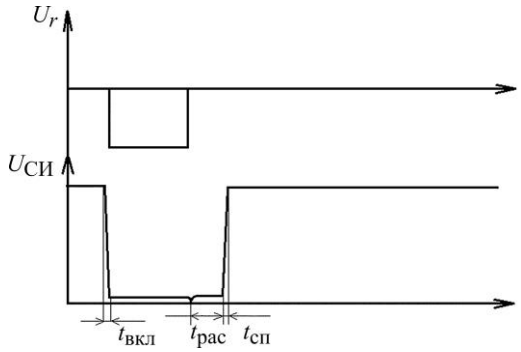


Рис. 5. Осцилограмма напряжений для определения динамических параметров транзистора КП926 (U_r – напряжение управляющего импульса; $t_{сп}$ – время спада тока)

Fig. 5. Voltage oscillograms for determination of the dynamic parameters of KP926 transistor (U_r – control pulse voltage; $t_{сп}$ – current decay time)

К динамическим параметрам относятся задержка включения $\tau_{вкл}$, а также задержка выключения, состоящая из времени рассасывания $\tau_{рас}$ и времени τ_c, определяющего скорость запирания тока. На время задержки могут повлиять процессы накопления и рассасывания заряда в структуре, а также паразитные емкости. Согласно описанию режимов измерения, при включении нормируется ток затвора, а при выключении – напряжение на затворе. Модель не позволяет задавать разные источники на разных этапах расчета, поэтому при моделировании для управления затвором использовался источник напряжения, параметры которого подобраны так, чтобы выдавать заданный ток во включенном состоянии.

Включение транзистора. Структура транзистора с указанием элементов, оказывающих влияние на динамические параметры, приведена на рис 6.

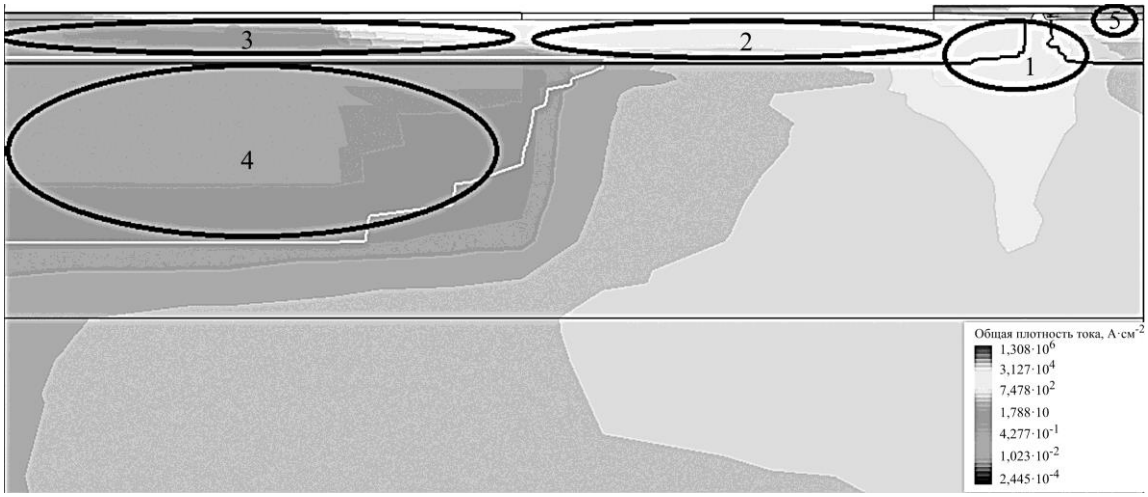


Рис. 6. Распределение плотности тока в структуре при включении в модели 1: 1 – слаболегированная область канала, которая должна заполняться носителями, прежде чем транзистор откроется; 2 – область под разделительным диэлектриком, где происходит перезарядка донной части p^+–n-перехода; 3 – область затвора с металлизацией, которая фактически не принимает участия во включении / выключении структуры; 4 – закрытая область донной части p^+–n-перехода; 5 – паразитный МДП-конденсатор между затвором и истоком

Fig. 6. Current density distribution in the structure when switched on in the model 1: 1 – a weakly alloyed area of the channel, which must be filled with carriers before the transistor opens; 2 – the area under the separation dielectric, where the bottom part of the p^+–n junction is recharged; 3 – the gate area with metallization which does not actually take part in the switching on/off of the structure; 4 – the closed area of the bottom part of the p^+–n junction; 5 – a parasitic metal-insulator-silicon capacitor between the gate and the source

Процесс включения структуры состоит из следующих этапов. На первом этапе открывается боковая часть p^+–n-перехода. Начинается накачка слаболегированной области канала избыточными носителями (область 1 на рис. 6). По мере нарастания тока в области под разделительным диэлектриком происходит перезарядка донной части

p^+–n-перехода под этой областью (область 2 на рис. 6). Это ограничивает скорость изменения напряжения и, как следствие, ток в области 1, что может давать дополнительную задержку. В области металлизации затвора металл должен эффективно шунтировать полупроводниковую структуру, поэтому здесь ток по полупроводнику достаточно мал (область 3 на рис. 6), а напряжение на p^+–n-переходе остается практически постоянным и отрицательным (область 4 на рис. 6, где белая линия показывает границу области пространственного заряда, которая зависит от напряжения на переходе). Эти участки не оказывают влияния на процессы включения и выключения. Предположение, что область затвора на периферии и под площадкой затвора при открывании транзистора работает как обычный диод, неверно.

На рис. 7 показаны результаты моделирования включения транзистора для моделей 1–3.

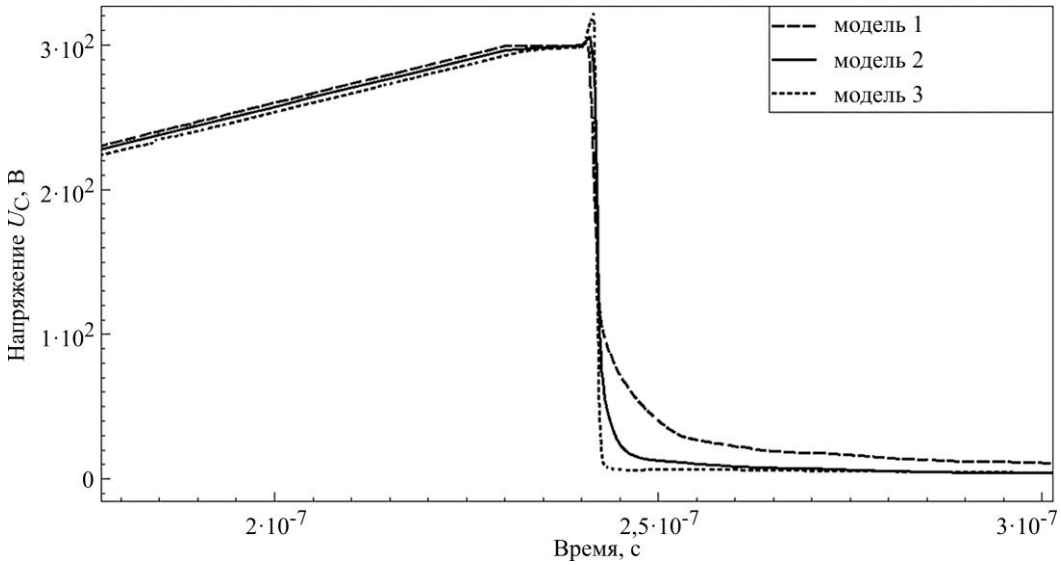


Рис. 7. Зависимость напряжения от времени при включении для моделей 1–3
Fig. 7. Voltage dependence on power-on time for models 1–3

Из рис. 7 следует, что наихудшее поведение демонстрирует модель 1, имитирующая область III на рис. 1. В этой модели площадь разделительного диэлектрика максимальная, соответственно, выше паразитная емкость перезаряжающейся части дна p^+–n-перехода. Модель 2, имитирующая область I на рис. 1, не имеет разделительного диэлектрика сбоку, поэтому скорость включения здесь ограничена только паразитной емкостью затвор-сток под разделительным диэлектриком на торцах. В модели 3 максимальная паразитная емкость затвор-исток (область 5 на рис. 6), но отсутствуют разделительные диэлектрики. Судя по тому, что включение структуры в этой модели произошло без задержек, МДП-структура не оказывает значительного влияния на этот процесс.

Можно заключить, что основным ограничивающим фактором для времени включения являются область затвора на периферии и под площадкой затвора и длина области 2 вдоль полоски истока (242 мкм) на рис. 6. Площадь металлизации не влияет на задержку включения, паразитные МДП-структуры также не оказывают существенного воздействия.

Влияние области затвора на периферии и под площадкой затвора на время включения транзистора легко устранить путем ее отключения от затвора [8], а уменьшение

длины области 2 (см. рис. 6) приводит к уменьшению эффективности использования площади кристалла. Снизить влияние области 2 на время включения можно путем увеличения коэффициента усиления прибора.

Выключение транзистора. При подаче отрицательного напряжения на затвор, прежде чем транзистор сможет перейти в закрытое состояние, из слаболегированной области должен быть удален избыточный заряд. Область избыточного заряда показана на рис. 8.

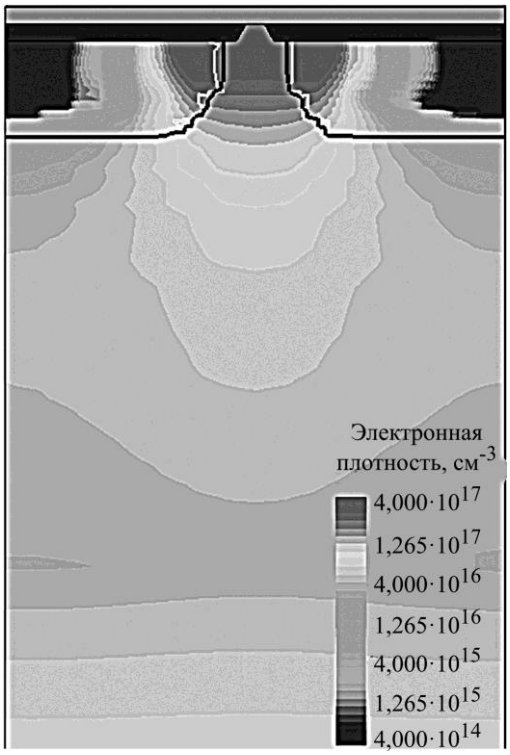


Рис. 8. Распределение свободных электронов в эпитаксиальном слое открытого транзистора для модели 3

Fig. 8. Distribution of free electrons in the epitaxial layer of an open transistor for model 3

Концентрация легирования в эпитаксиальном слое модели равна $4 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$. Из рис. 8 следует, что у открытого канала концентрация свободных носителей превышает это значение на один-три порядка. Помимо этого, следует учитывать, что по пути сток-исток протекает значительный ток, который непрерывно пополняет число носителей в канале. Поэтому мгновенный ток затвора, необходимый для быстрого удаления этого заряда, должен быть значительно выше, чем постоянный ток стока. В случае если ток ограничен, удаление заряда занимает больше времени. В целом время задержки определяется двумя факторами: совокупным зарядом, который необходимо удалить, и током затвора, который для этого применяется. Осциллограммы напряжений при выключении приведены на рис. 9. Видно, что модели 1 и 2 показывают сопоставимые результаты. Различия могут быть обусловлены тем, что в модели 1 происходит также перезарядка емкости под разделительным диэлектриком сбоку (область 2 на рис. 6). Модель 3 имеет на порядок более высокие задержки. Это может быть обусловлено тем, что в этой модели площадь контакта затвора мала по сравнению с остальными моделями. Из-за этого максимальный ток затвора существенно ограничен. Для проверки этой теории проведем дополнительное моделирование модели 3, задав коэффициент площади 530 вместо 8. Результаты моделирования приведены на рис. 10, из которого видно, что увеличение площади затвора в модели (а вместе с ней и пропускной способности по току) позволяет в разы быстрее отводить ток из канала, в результате чего быстродействие повышается. Несмотря на то что в модели с коэффициентом площади 530 созданы условия отведения тока, близкие к действующим в моделях 1 и 2, время выключения все еще существенно превышает времена, характерные для этих моделей. Это может быть обусловлено влиянием других паразитных емкостей в приборе.

Влияние донной части p^+–n-перехода под областью 2 на рис. 6 на динамические параметры может быть оценено исходя из зависимости динамических параметров от длины разделительного диэлектрика. Такая зависимость представлена на рис. 11.

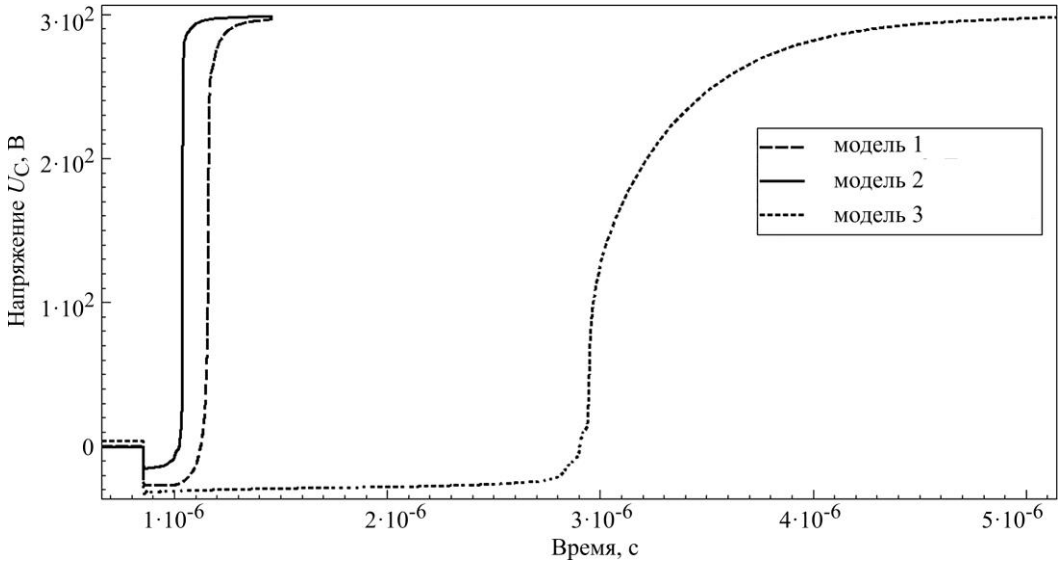


Рис. 9. Зависимость напряжения от времени при выключении для моделей 1–3
Fig. 9. Voltage dependence on shutdown time for models 1–3

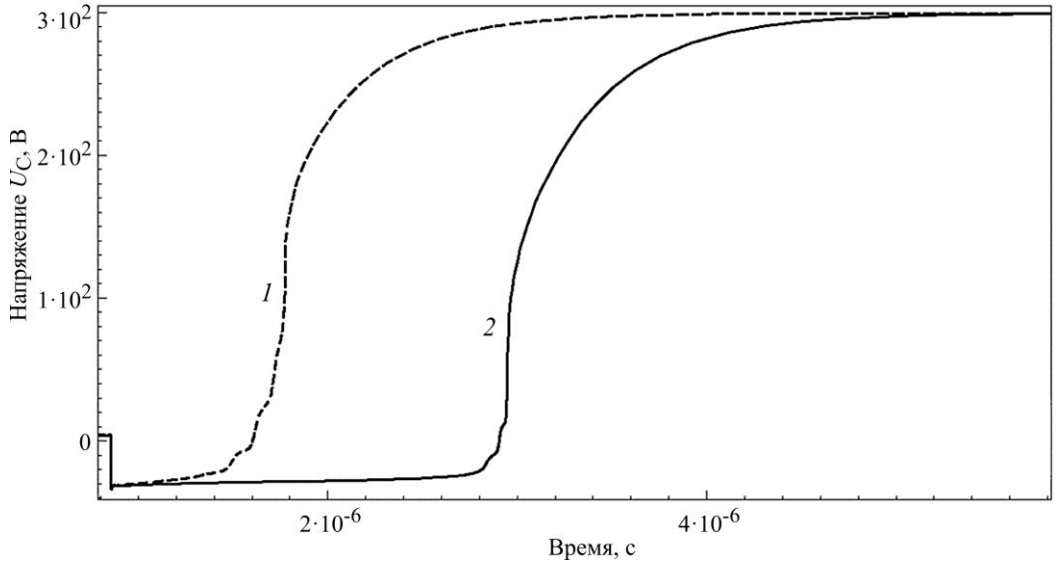


Рис. 10. Влияние пропускной способности по току затвора на время задержки выключения для модели 3 при коэффициенте площади 530 (кривая *1*) и 8 (кривая *2*)
Fig. 10. The effect of gate current throughput on the shutdown delay time in model 3 with surface coefficient 530 (curve *1*) and 8 (curve *2*)

На рис. 11 время включения структур с длиной разделительного диэлектрика 2,4 и 4,5 мкм практически совпадает и меньше времени включения структуры с длиной разделительного диэлектрика 12,4 мкм на 40 %. При выключении структуры с длиной 4,5 и 12,4 мкм времена выключения показывают небольшую разницу, хотя явно видно, что в структуре с длиной диэлектрика 4,5 мкм выключение начинается быстрее. Структура с длиной 2,4 мкм не выключается до конца, напряжение сток-исток на ней не превышает 270 В, следовательно сопротивление транзистора составляет 270 Ом. Это говорит о том, что изменение этого параметра требует осторожности.

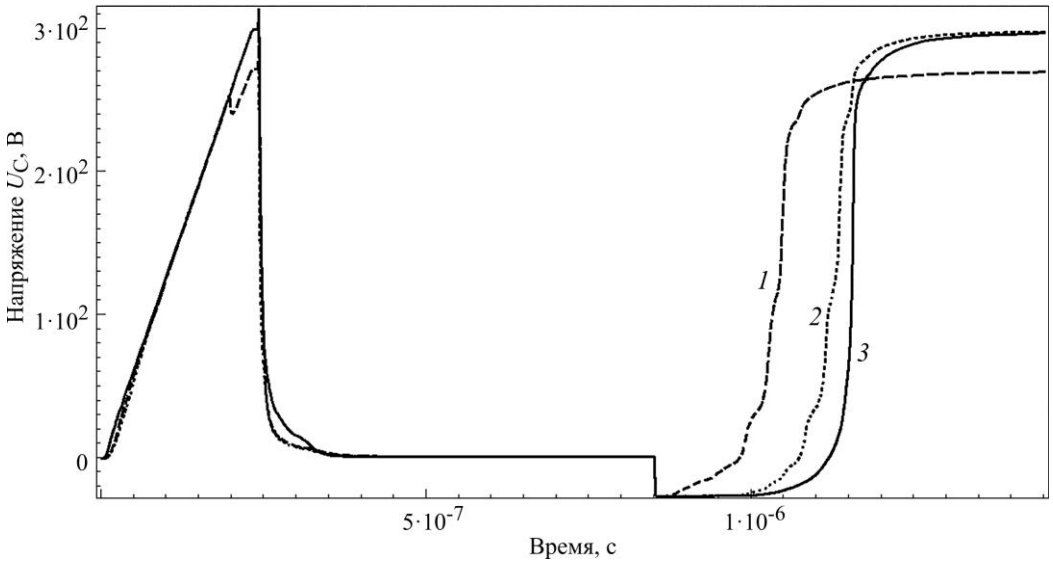


Рис. 11. Переходной процесс включения и выключения транзистора для модели 1 при разных значениях длины разделительного диэлектрика: *1* – 2,4 мкм; *2* – 4,5 мкм; *3* – 12,4 мкм
Fig. 11. The transient process of switching on and off the transistor for model 1 at different values of the length of the separation dielectric: *1* – 2.4 μm; *2* – 4.5 μm; *3* – 12.4 μm

Исходя из результатов моделирования можно сделать вывод, что наличие в структуре области, соответствующей модели 3 (область II на рис. 1), будет значительно замедлять работу прибора, так как еще в течение нескольких микросекунд после закрытия остальной части прибора здесь будет протекать ток. При удалении этой области переходной процесс выключения транзистора должен в большей степени соответствовать графикам, полученным для моделей 1 и 2.

Необходимость удалить заряд из слаболегированной области является принципиальным ограничивающим фактором для времени выключения этого типа приборов. Поэтому скорость выключения во многом определяется током затвора. Ограничение этого тока, например последовательным сопротивлением, будет существенно сказываться на времени выключения транзистора.

Проведенный анализ процесса выключения транзистора КП926 позволяет сделать следующие выводы:

– необходимо убрать каналы из-под контакта к истоку, а p^+-область отключить от затвора;

– отключить пассивную область затвора на периферии и под площадкой затвора от управляющей области затвора высокоомной n^--областью стока;

– экспериментально установить значения пикового тока затвора, требуемые для получения заданных времен задержки выключения.

Заключение. Моделирование структуры транзистора КП926 с использованием Sentaurus TCAD позволило определить влияние конструктивных и электрофизических параметров структуры на основные электрические параметры прибора и сделать ряд рекомендаций по улучшению конструкции прибора. Представленная модель прибора со статической индукцией позволяет анализировать влияние конструктивных и электрофизических параметров на быстродействие прибора. Предложенные пути по улучшению конструкции кристалла дают возможность увеличить скорость переключения более чем на порядок и обеспечить способность работы транзистора на частоте до 10 МГц.

С учетом приведенных рекомендаций [8] спроектирована новая конструкция транзистора КП926, изготовлены фотошаблоны и ведется изготовление опытных образцов. Улучшение частотных свойств транзистора КП926 позволит создавать на базе данного прибора вторичные источники электропитания с меньшими габаритами и более высокой эффективностью, что очень важно для многих отраслей радиоэлектронной промышленности.

Литература

1. ***Максименко Ю.*** Мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией КП926А, Б // Современная электроника. 2023. № 4. С. 24–27.

2. ***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.

3. ***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.

4. ***Боднарь Д.*** Полупроводниковая микроэлектроника – 2023 г. Ч. 1: Широкозонные полупроводники раздвигают горизонты достигнутого // Электронные компоненты. 2023. № 11. С. 17–25. EDN: DXFSJL.

5. ***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.

6. ***Воронин П. А.*** Силовые полупроводниковые ключи: Семейства, характеристики, применение. М.: Додэка-XXI, 2001. 380 с.

7. ***Максименко Ю. Н.*** Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией: монография. Новосибирск: PVN, 2022. 214 с.

8. ***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.

Статья поступила в редакцию 06.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 14.06.2024 г.; принята к публикации 10.10.2024 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 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. Maksimenko Yu. Powerful high-voltage transistor with static induction KP926A, B. *Sovremennaya elektronika*, 2023, no. 4, pp. 24–27. (In Russian).

2. 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

3. 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

4. Bodnar' D. Semiconductor microelectronics – 2023. Pt. 1. Wide-band semiconductors are pushing the horizons of what has been achieved. *Elektronnye komponenty = Electronic Components*, 2023, no. 11, pp. 17–25. (In Russian). EDN: DXFSJL.

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

6. Voronin P. A. *Power electronics semiconductor switches: Families, characteristics, application.* Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2001. 380 p. (In Russian).

7. Maksimenko Yu. N. *Powerful static induction semiconductor devices*, monograph. Novosibirsk, PVN Publ., 2022. 214 p. (In Russian).

8. Maksimenko Yu. N. Static induction transistor KP926 with increased speed. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovyye pribory = Electronic Technology. Ser. 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.

The article was submitted 06.06.2024; approved after reviewing 14.06.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Yury N. Maksimenko – Cand. Sci. (Eng.), Leading 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 for Design Problems of Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), kpetrosyants@hse.ru

Denis S. Silkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinnskaya st., 34), dsilkin@hse.ru

Victoria K. Grabezhova – General Manager, Vega Biomicroelectronic Technology Design Center LLC (Russia, 630082, Novosibirsk, Dachnaya st., 60A), Vikavega10@yandex.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Научная статья
УДК 621.3.040.774.2
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-787-791
EDN: DYUHIH

Изменение характеристик аналогового выходного каскада при воздействии низкоинтенсивного излучения

В. В. Матешева, В. Д. Попов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

wdpopov@mail.ru

Аннотация. При использовании МОП ИМС в аппаратуре космических объектов возникает задача оценки радиационной стойкости на стадии испытания тестовых структур. При длительном низкоинтенсивном облучении МОП-транзистора накопленный заряд на ловушках подзатворного оксида уменьшается из-за рекомбинации с электронами, которые переносятся из кремния в результате эмиссии Шоттки. Поэтому основное влияние на параметры МОП-транзистора оказывает заряд поверхностных ловушек на границе раздела Si-SiO_2. В работе представлены результаты прогнозирования характеристик выходного каскада на МОП-транзисторах при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения. Показано увеличение крутизны ВАХ при возрастании плотности поверхностных дефектов на линейном участке, что вызвано отрицательным зарядом поверхностных дефектов на границе раздела Si-SiO_2 и снижением тока на пологом участке ВАХ. Расчеты сделаны на основе данных, полученных в эксперименте по облучению гамма-лучами МОП-транзисторов, и измерений ВАХ с помощью измерителя характеристик полупроводниковых приборов типа Agilent B1500A.

Ключевые слова: выходной каскад, гамма-излучение, МОП-транзистор

Благодарность: авторы выражают благодарность А. Ф. Кожину за помощь в проведении дозиметрии гамма-излучения.

Для цитирования: Матешева В. В., Попов В. Д. Изменение характеристик аналогового выходного каскада при воздействии низкоинтенсивного излучения // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 787–791. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-787-791. – EDN: DYUHIH.

© В. В. Матешева, В. Д. Попов, 2024

Original article

Changes in the characteristics of the analog output stage when exposed to low-intensity radiation

V. V. Matesheva, V. D. Popov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

wdpopov@mail.ru

Abstract. While using MOS ICs in equipment for space objects, the task of assessing radiation resistance during the testing phase of test structures arises. With prolonged low-intensity irradiation of the MOSFET, the accumulated charge on the gate oxide traps decreases due to recombination with electrons that come from silicon as a result of Schottky emission. Therefore, the main impact on the MOSFET parameters is exerted by the charge of surface traps at the Si-SiO_2 interface. In this work, the results of characteristics forecast of the MOSFET output stage with exposure to low-intensity ionizing radiation are presented. It has been demonstrated that the slope of the current-voltage characteristic increases with an increase in the density of surface defects at straight line portion, which is due to negative charge of surface defects at the Si-SiO_2 interface and a decrease in current on the flat section of current-voltage characteristic. The calculations are based on data obtained in an experiment on the gamma-ray emission of MOSFETs and on measurements of the current-voltage characteristics using an Agilent B1500A semiconductor device characteristic meter.

Keywords: output stage, gamma radiation, MOS transistor

Acknowledgments: the authors express their gratitude to A. F. Kozhin for assistance in conducting gamma radiation dosimetry.

For citation: Matesheva V. V., Popov V. D. Changes in the characteristics of the analog output stage when exposed to low-intensity radiation. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 787–791. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-787-791. – EDN: DYUHIH.

Введение. При моделирующих испытаниях устройств на МОП-транзисторах чаще всего используется низкоинтенсивное облучение гамма-излучением [1]. При этом снижается эффект зарядки дефектов в объеме оксидной пленки из-за эмиссии электронов из кремния в результате эмиссии Шоттки [2]. Поэтому основное влияние на изменение характеристик МОП-транзистора в этом случае обусловлено образованием поверхностных дефектов (ловушек) на границе раздела Si-SiO_2.

Цель настоящей работы – исследование изменения характеристик выходного каскада на МОП-транзисторах при низкоинтенсивном облучении гамма-излучением по результатам испытания тестовых транзисторов.

Эксперимент. Проведены исследования радиационных эффектов в выходном каскаде, построенном на МОП-транзисторах с *n*-каналом (рис. 1) [3]. МОП-транзисторы облучали в вертикальном канале, установленном в шахте-хранилище реактора ИРТ (НИЯУ МИФИ). Мощность дозы гамма-излучения, равная 0,1 рад/с, контролировалась прибором ДК-101. Облучение проводили в пассивном режиме (все выводы МОП-транзистора соединены между собой). До и после каждого этапа облучения измеряли зависимость тока стока I_C от напряжения на затворе U_3 МОП-транзисторов при напряжении

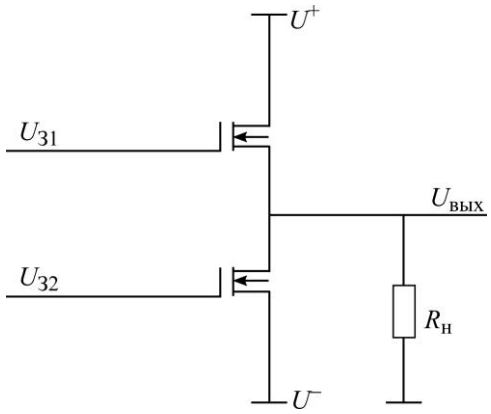


Рис. 1. Схема выходного каскада с нагрузкой (U_{31} и U_{32} – напряжения на затворе первого и второго транзистора соответственно)

Fig. 1. Output stage diagram with load (U_{31} and U_{32} – gate voltages of the first and second transistor, respectively)

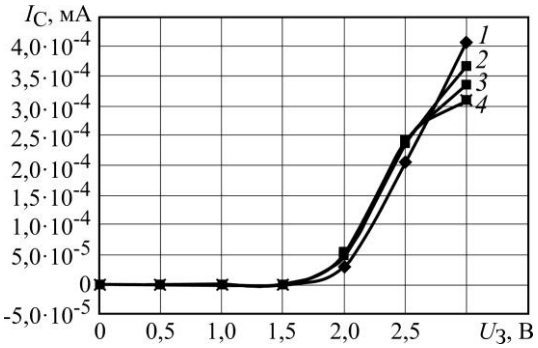


Рис. 2. ВАХ МОП-транзисторов при разных дозах гамма-излучения *D*: *1* – 0 крад; *2* – 90 крад; *3* – 190 крад; *4* – 294 крад

Fig. 2. Current-voltage characteristics of the MOSFET at different doses of gamma radiation *D*: *1* – 0 krad; *2* – 90 krad; *3* – 190 krad; *4* – 294 krad

на стоке U_C = 3 В с использованием анализатора характеристик полупроводниковых приборов типа Agilent B1500. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Измерения ВАХ МОП-транзисторов показали, что в начале облучения образуется заряд в объеме подзатворного оксида, а затем начинается процесс образования поверхностных дефектов на границе раздела Si-SiO_2. Этот процесс вызывает сдвиг порогового напряжения $\Delta U_З$ в сторону бóльших напряжений на затворе МОП-транзистора:

$$\Delta U_З = \frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{п.д},$$

где q – заряд электрона; C_{ox} – удельная емкость подзатворного оксида; $\Delta N_{п.д}$ – изменение плотности поверхностных дефектов (поверхностных состояний).

Результаты расчета плотности представлены на рис. 3. В случае использования стоковой характеристики при постоянном напряжении на затворе вклад заряда поверхностных дефектов составляет часть общей плотности поверхностных дефектов (кривая *2* на рис. 3). Это обусловлено наведением заряда в стоке МОП-транзистора зарядом поверхностных дефектов на границе раздела Si-SiO_2, которые находятся вблизи стока. Это явление называется эффектом короткого канала [4]. В результате область пространственного заряда (ОПЗ) в области канала под затвором расширяется, поскольку к заряду, индуцированному потенциалом затвора через емкость оксида, добавится заряд, индуцированный положительным напряжением стока. Расчет проводили с использованием выражения

$$\Delta U_C = \frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{п.д},$$

где ΔU_C – сдвиг напряжения на стоке МОП-транзистора под действием части заряда поверхностных дефектов.

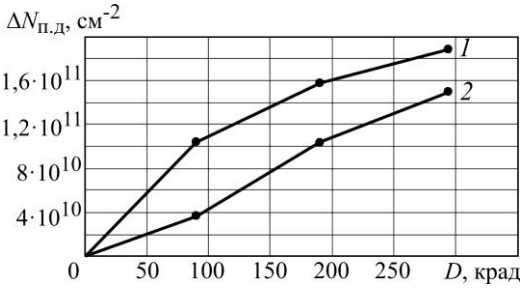


Рис. 3. Изменение плотности поверхностных дефектов $\Delta N_{п.д}$ при облучении: *1* – общая плотность; *2* – часть общей плотности

Fig. 3. Change in the density of surface defects $\Delta N_{п.д}$ during irradiation: *1* – total density; *2* – part of the total density

Сравнивая кривые *1* и *2* на рис. 3, можно оценить долю поверхностных дефектов, которые создают электрическое поле в стоке МОП-транзистора. Доля с увеличением поглощенной дозы достигает 80 %.

Результаты исследования. В работе использовали универсальную модель МОП-транзистора [5], которая описывает как крутой, так и пологий участки ВАХ. В этой модели применяли значения токов стока I_C и напряжений на стоке U_C и затворе $U_З$ следующим образом:

$$I_C = Ak(U_З - U_0)^2\left[1-\exp(-\frac{KU_C}{U_З - U_0})\right], \quad (1)$$

где $I_н = Ak(U_З - U_0)^2$ – ток насыщения на границе крутого и пологого участков ВАХ; A и K – параметры модели; k – крутизна МОП-транзистора; U_0 – пороговое напряжение.

По результатам расчетов с использованием выражения (1) построен график зависимости $\frac{I_C}{I_н}(\frac{U_C}{U_З - U_0})$ при разных дозах и определены постоянные значения параметров модели A = 1,01 и K = 1,7. Изменение ВАХ в модели (1) при разных дозах гамма-излучения представлено на рис. 4. Наблюдается монотонное увеличение крутизны крутого участка модельной ВАХ.

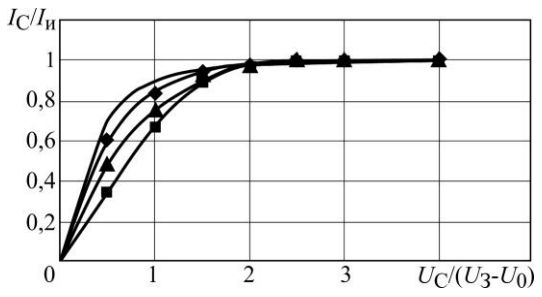


Рис. 4. Изменение модельной ВАХ при разных дозах гамма-излучения *D*: –■– 0 крад; –▲– 90 крад; –♦– 190 крад; —— 294 крад

Fig. 4. Changes in the model current-voltage characteristic at different doses of gamma radiation *D*: –■– 0 krad; –▲– 90 krad; –♦– 190 krad; —— 294 krad

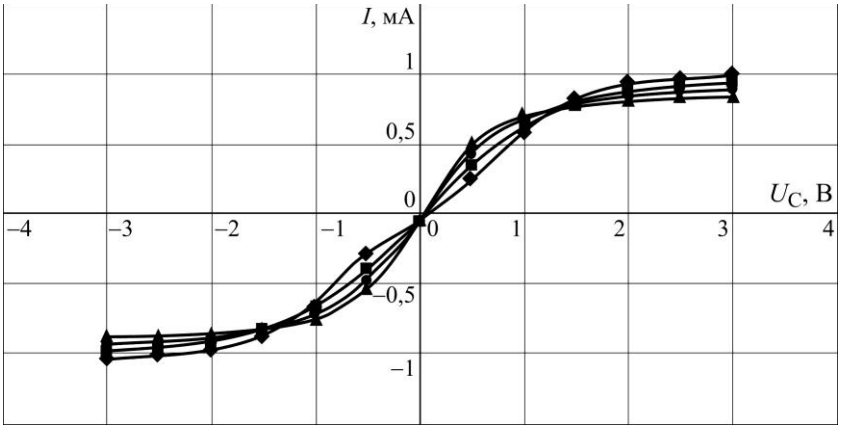


Рис. 5. Дозовое изменение ВАХ выходного каскада при нагрузке R = 100 Ом: –♦– 0 крад; –■– 90 крад; –●– 190 крад; –▲– 294 крад

Fig. 5. Dose changes in the current-voltage characteristics of the output stage at a load of R = 100 Ohm: –♦– 0 krad; –■– 90 krad; –●– 190 krad; –▲– 294 krad

Изменения в выходном каскаде аналоговой схемы под действием гамма-излучения показаны на рис. 5. Видно увеличение наклона крутой части ВАХ и снижение высоты на пологом участке. Сдвиг на крутом участке обусловлен зарядом поверхностных дефектов. Этот результат является следствием эффекта короткого канала.

Заключение. Проведенные исследования показали повышение крутизны ВАХ выходного каскада на линейном участке. Это вызвано отрицательным зарядом поверх-

ностных дефектов на границе раздела Si-SiO_2, который наводит электрическое поле в области стока вследствие эффекта короткого канала. Кроме того, наблюдается снижение тока на пологом участке ВАХ.

Литература

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под науч. ред. ***Г. Г. Райкунова***. М.: Физматлит, 2013. 255 с.

2. ***Лебедев А. А., Орлова А. Ю., Попов В. Д.*** Роль эмиссии электронов в образовании поверхностных состояний в МОП-структуре при облучении гамма-лучами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. № 1. С. 19–22. EDN: NWHIDB.

3. ***Эннс В. И., Кобзев Ю. М.*** Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: краткий справочник разработчика. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 454 с.

4. ***Yau L. D.*** A simple theory to predict the threshold voltage of short-channel IGFET's // Solid State Electron. 1974. Vol. 17. Iss. 10. P. 1059–1063. https://doi.org/10.1016/0038-1101(74)90145-2

5. ***Мырова Л. О., Попов В. Д., Верхотуров В. И.*** Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений. М.: Радио и связь, 1993. 267 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 25.01.2024 г.;
принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Матешева Виктория Владимировна – студентка Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31), kmoptransistor@yandex.ru

Попов Виктор Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31), wdpopov@mail.ru

References

1. Raikunov G. G. (sci. ed.) *Ionizing radiation from outer space and its impact on spacecraft equipment.* Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 255 p. (In Russian).

2. Lebedev A. A., Orlova A. Yu., Popov V. D. Role of electron emission in formation of the surface states in the MOS at gamma radiation. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu = Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*, 2011, no. 1, pp. 19–22. (In Russian). EDN: NWHIDB.

3. Enns V. I., Kobzev Yu. M. *Design of analog CMOS microcircuits,* quick reference book for developer. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2005. 454 p. (In Russian).

4. Yau L. D. A simple theory to predict the threshold voltage of short-channel IGFET's. *Solid State Electron.*, 1974, vol. 17, iss. 10, pp. 1059–1063. https://doi.org/10.1016/0038-1101(74)90145-2

5. Myrova L. O., Popov V. D., Verkhoturov V. I. *Analysis of communication systems radiation resistance.* Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 267 p. (In Russian).

The article was submitted 26.12.2023; approved after reviewing 25.01.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Victoria V. Matesheva – Student of National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe hwy., 31), kmoptransistor@yandex.ru

Viktor D. Popov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Micro- and Nanoelectronics National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe hwy., 31), wdpopov@mail.ru

Научная статья
УДК 519.168:519.857:621.3.049.771.14
doi: 10.24151/1561-5405-2024-29-6-792-804
EDN: EHPCSZ

Алгоритм динамического программирования для оптимизации дерева буферизации по числу буферов и инверторов

К. К. Малинаускас

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

kostas.malinauskas@org.miet.ru

Аннотация. Вставка буферных элементов в цифровых схемах необходима для контроля задержек в межсоединениях, которые играют доминирующую роль в производительности современных субмикронных СБИС. Синтез деревьев буферизации и их укладка на кристалле осложнены дефицитом свободного места после размещения основных логических вентилей, а также ограничениями потребляемой мощности. Использование инверторов в качестве буферных элементов, как правило, более эффективно с точки зрения площади, потребляемой мощности и временны́х характеристик. Однако необходимо соблюдать четность инверторов в дереве на пути до любого приемника для сохранения логики работы схемы. Для этого применяются различные эвристические методы, комбинирующие использование инверторов и буферов, но оптимальность получаемых решений исследована недостаточно. В работе представлен алгоритм для оптимизации заданного буферного дерева, основанный на динамическом программировании и заменяющий максимально возможное число буферов на инверторы. Алгоритм имеет линейную временну́ю и пространственную сложности и достаточно прост в реализации. Проведен статистический анализ эффективности найденных оптимальных решений в сравнении с результатами известной простой эвристики. Установлено, что наибольшая эффективность достигается в случаях, когда конечные приемники сигнала подключены только к листьям буферного дерева: доля буферов снижается в среднем в 1,7 раза, максимум – примерно в 3 раза по сравнению с эвристическим решением.

Ключевые слова: буферизация соединений СБИС, буферное дерево, методы оптимизации, динамическое программирование, алгоритмы

Для цитирования: Малинаускас К. К. Алгоритм динамического программирования для оптимизации дерева буферизации по числу буферов и инверторов // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 792–804. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-792-804. – EDN: EHPCSZ.

© К. К. Малинаускас, 2024

Original article

A dynamic programming algorithm for the buffering tree optimization by the number of buffers and inverters

K. K. Malinauskas

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

kostas.malinauskas@org.miet.ru

Abstract. Repeater elements insertion (buffering) in digital circuits is necessary to control interconnect delays, which play a dominant role in the timing closure of deep submicron VLSI designs. The buffering tree synthesis and packing are complicated by the lack of free space after the main logic placement is done, as well as by the power constraints. Using inverters instead of buffer elements is generally more efficient in terms of area, power consumption and timing characteristics. However, it is necessary to maintain the inverters parity in a path to any receiver in the tree to preserve the circuit operation logic. For this purpose, various heuristic methods are applied combining the use of inverters and buffers, but the optimality of the resulting solutions has not been sufficiently studied. In this work, a buffer tree optimization algorithm based on dynamic programming and replacing the maximum possible number of buffers with inverters is presented. The algorithm has linear time and space complexities and is quite simple to implement. A statistical analysis of the efficiency of computed optimal solutions in comparison with the results of well-known simple heuristics was performed. It has been established that the best results are achieved in the cases with only tree leaf repeaters driving final receivers: the share of buffers is reduced by an average of 1.7 times, with a maximum of 3 times, compared to the heuristic solution.

Keywords: VLSI interconnect buffering, buffering tree, repeater tree optimization, dynamic programming, algorithms

For citation: Malinauskas K. K. A dynamic programming algorithm for the buffering tree optimization by the number of buffers and inverters. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 792–804. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-792-804. – EDN: EHPCSZ.

Введение. С уменьшением технологических размеров элементов современных СБИС задержки в соединениях становятся все более критичными [1, 2]. Одно из решений, используемых в проектировании, – вставка специальных буферных элементов, не меняющих логику работы схемы, в точки разрыва соединений.

В настоящей работе рассматривается оптимальный выбор типов элементов (инвертирующих или неинвертирующих) в заданном буферном дереве. В качестве неинвертирующих элементов используется минимальное число буферов или парных инверторов. Предлагается эффективный алгоритм оптимизации на основе динамического программирования, имеющий линейную вычислительную сложность. Выполняется статистический анализ эффективности оптимальных решений в сравнении с простой эвристической оптимизацией, разрешающей использование буферов только в терминальных узлах дерева. Без ограничения общности рассматриваются только сигнальные цепи (не цепи синхронизации), требующие относительно небольшого числа буферных элементов (до 20) и положительных полярностей сигналов на всех приемниках.

Буферизация. Буферизация цепей необходима для контроля максимальной нагрузки на выходах логических вентилей и уменьшения негативного эффекта паразитных параметров длинных проводников, а следовательно, для уменьшения задержек цифрового сигнала в межсоединениях и улучшения форм фронтов переключения (рис. 1).

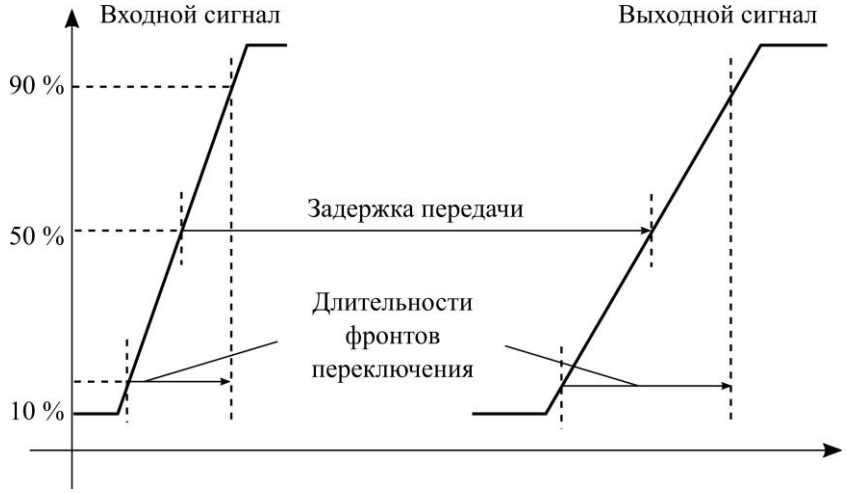


Рис. 1. Временны́е характеристики цифрового сигнала: задержка передачи и длительность (наклон фронта) переключения
Fig. 1. Digital signal timing characteristics: propagation delay and transition delay (slope, slew)

Буферизация проводится для больших цепей, таких как цепи синхронизации [3], а также для критических сигнальных цепей в соответствии с оценками их временны́х характеристик [4]. Одновременно следует соблюдать ограничения доступной свободной площади на кристалле и потребляемой мощности. Новые буферные элементы и их соединения образуют деревья (рис. 2). При этом используются новые элементы двух типов: буферы, или логические повторители, и инвертирующие буферы, или логические инверторы. Последние, как правило, более эффективны по площади и мощности и по скорости передачи сигналов [4]. Однако при использовании инверторов полярности сигналов в различных ветвях дерева могут быть разными (см. рис. 2).

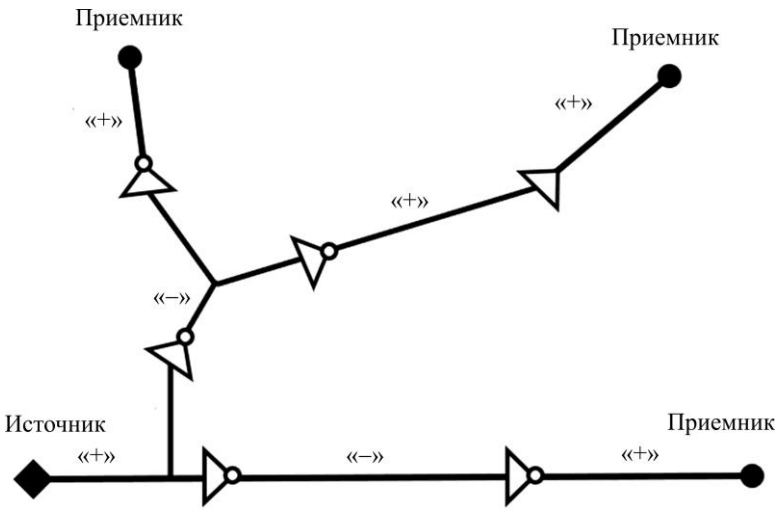


Рис. 2. Буферизация цепи
Fig. 2. The net buffering

Для соблюдения требуемых полярностей у каждого приемника необходимо выдержать четность числа инверторов на пути от источника. Одним из подходов является синтез дерева из одних только инверторов с последующей заменой некоторых элементов на буферы (или вставкой дополнительных инверторов) для исправления полярностей на отдельных приемниках. Для этого применяются различные эвристические подходы, но вопросу оптимальности получаемых решений уделяется недостаточно внимания. В работе [3] рассматривается простая эвристика, вставляющая дополнительные инверторы у приемников, где полярность нарушена. Для того чтобы таких приемников всегда было не более половины, сначала может быть вставлен дополнительный инвертор у источника (корня дерева). Далее предлагается эвристика для уменьшения количества необходимых дополнительных инверторов путем их объединения около узлов дерева – общих предшественников терминальных узлов с нарушенной полярностью. В работе [4] описывается другая эвристика для вставки дополнительных инверторов одновременно с построением всего дерева. Тривиальным и самым затратным решением по площади логических вентилей является использование в дереве всех буферов (или парных инверторов) [5]. Будем буферные деревья представлять ориентированными графами. На рис. 3 показана их визуализация с помощью программного средства Graphviz [6]. Как видно, в зависимости от выбранной эвристики количество неинвертирующих буферов (или дополнительных инверторов) может быть разным.

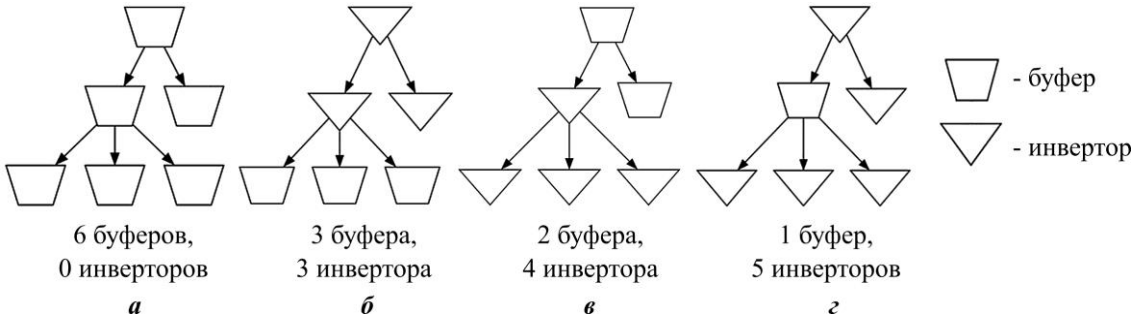


Рис. 3. Реализации буферного дерева с положительной полярностью на всех приемниках: *а* – тривиальный вариант (все буферы); *б* – простая оптимизация (все инверторы, кроме буферов у отдельных приемников); *в* – случайное решение с соблюдением полярностей; *г* – оптимальное решение

Fig. 3. Repeater tree implementations with all sinks having positive polarity: *a* – trivial solution (all buffers); *b* – simple optimization (all inverters but some terminal buffers); *c* – random solution with correct sink polarities; *d* – optimal solution

Постановка задачи. Введем следующие обозначения: $T = \{1, ..., n\}$ – множество узлов буферного дерева (буферов) с корнем $r \in T$, соединенным непосредственно с источником сигнала; $\tau \subseteq T$ – подмножество терминальных узлов, соединенных непосредственно с приемниками сигнала. Будем требовать положительную полярность на выходах всех терминальных узлов. Для простоты буферное дерево (граф) также будем обозначать *T*. Отметим, что для одной цепи таких деревьев может быть несколько (см. рис. 2) и они могут быть оптимизированы независимо.

Введем булевы переменные решения: $x = (x_1, ..., x_n)$, где для каждого узла *i* выбор $x_i = 0$ будет означать выбор инвертора, $x_i = 1$ – выбор (неинвертирующего) буфера. Тогда $F(x) = x_1 + ... + x_n$ – стоимость реализации дерева, равная общему числу буферов. Полярность на выходе каждого узла j обозначим как функцию $p_j(x)$, принимающую значение 0 для положительной полярности, 1 – для отрицательной полярности. Оче-

видным образом $p_j(x) = \bigoplus_{i \in \pi_j} \overline{x}_i$ (сумма по модулю 2 отрицаний x_i), где $\pi_j \subseteq T$ – множество узлов, составляющих путь от корня r до узла j.

Тогда задачу оптимизации буферного дерева с ограничениями на положительную полярность у приемников можно сформулировать следующим образом:

$$\mathcal{P}: \begin{cases} F(x) \to \min, \\ \forall j \in \tau : p_j(x) = 0. \end{cases}$$

Пример оптимального решения $\tilde{x}$ задачи $\mathcal{P}$ изображен на рис. 4.

$T = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,
$r = 1$, $\tau = \{3, 4, 5, 6\}$,
$\tilde{x} = (0, 1, 0, 0, 0, 0)$,
$p_3 = 1 + 0 + 1 = 0$,
$p_4 = 1 + 0 + 1 = 0$,
$p_5 = 1 + 0 + 1 = 0$,
$p_6 = 1 + 1 = 0$,
$\tilde{F} = F(\tilde{x}) = 0 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 = 1$

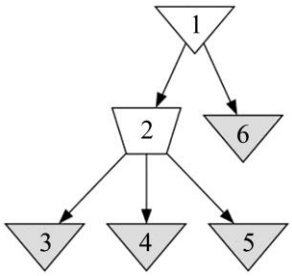


Рис. 4. Пример оптимального решения задачи $\mathcal{P}$ (3–6 – терминальные узлы)
Fig. 4. An example of optimal solution of $\mathcal{P}$ (3–6 – terminal nodes)

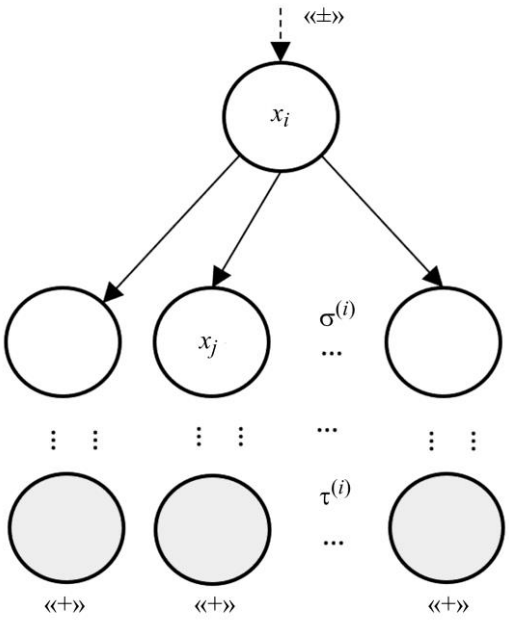


Рис. 5. Поддерево $T^{(i)}$
Fig. 5. Subtree $T^{(i)}$

Алгоритм динамического программирования. В основе динамического программирования лежит идея разбиения, обычно рекурсивного, исходной задачи оптимизации на подзадачи меньшей сложности. Если решения последних могут быть использованы для решения исходной задачи, то говорят, что она имеет оптимальную подструктуру [7]. Покажем, что метод применим к оптимизации буферного дерева.

Для формулировки подзадач введем следующие обозначения (рис. 5): $T^{(i)} \subseteq T$ – множество узлов поддерева с корнем $i \in T$, включая терминальные узлы $\tau^{(i)} \subseteq T^{(i)}$; вектор булевых переменных решения для поддерева $T^{(i)}$: $x^{(i)} = (x_j \mid j \in T^{(i)})$; стоимость реализации поддерева $F^{(i)}(x^{(i)}) = \sum_{j \in T^{(i)}} x_j$. Полярность на выходе j-го узла $p_j^{(i)}(x^{(i)}) = \bigoplus_{k \in \pi_j^{(i)}} \overline{x}_k$, где $\pi_j^{(i)}$ – путь от i до j.

Теперь сформулируем декомпозицию исходной задачи $\mathcal{P}$ на $2n$ подзадач (по две подзадачи для каждого узла i):

$$\mathcal{P}_i: \begin{cases} F^{(i)}(x^{(i)}) \to \min \\ \forall j \in \tau^{(i)} : p_j^{(i)}(x^{(i)}) = 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad \mathcal{P}_i^*: \begin{cases} F^{(i)}(x^{(i)}) \to \min \\ \forall j \in \tau^{(i)} : p_j^{(i)}(x^{(i)}) = 1. \end{cases}$$

По сути задача $\mathcal{P}_i$ – оптимизация поддерева $T^{(i)}$ при положительной полярности на входе и с ограничениями на положительную полярность на выходах всех терминальных узлов, а сопряженная задача $\mathcal{P}_i^*$ эквивалентна такой же оптимизации поддерева $T^{(i)}$, но при отрицательной полярности на входе. Тогда исходная задача для всего дерева T с корнем r имеет вид $\mathcal{P} = \mathcal{P}_r$. Стратегия ее решения такова: для всех $i \in T$, начиная с листьев и двигаясь к корню дерева, искать два оптимальных решения $\tilde{x}^{(i)}$ и $\tilde{x}^{*(i)}$: $\tilde{F}^{(i)} = F^{(i)}\left(\tilde{x}^{(i)}\right)$ – для подзадачи $\mathcal{P}_i$ и $\tilde{F}^{*(i)} = F^{(i)}\left(\tilde{x}^{*(i)}\right)$ – для сопряженной подзадачи $\mathcal{P}_i^*$. Для этого необходимо использовать ранее найденные оптимальные решения для поддеревьев и суперпозиции

$$F^{(i)}(x^{(i)}) = x_i + \sum\nolimits_{k \in \sigma^{(i)}} F^{(k)}(x^{(k)}),$$

где $\sigma^{(i)} \subseteq T^{(i)}$ – множество непосредственных потомков узла i,

$$\forall k \in \sigma^{(i)}, \forall j \in \tau^{(k)} : p_j^{(i)} = \overline{x}_i \oplus p_j^{(k)}.$$

Таким образом, следует выбирать лучшие решения из вариантов $x_i = 0$ и $x_i = 1$ в комбинациях с $\sum_{k \in \sigma^{(i)}} \tilde{F}^{(k)}$ и $\sum_{k \in \sigma^{(i)}} \tilde{F}^{*(k)}$. Отметим, что стратегия оптимальна в силу независимости подзадач по переменным и простоты аддитивного разложения целевой функции. По достижении корня будет найдена оптимальная стоимость $\tilde{F}^{(r)}$ искомой реализации $\tilde{x}^{(r)}$ дерева $T^{(r)}$. На рис. 6 изображен пример оптимальной реализации буферного дерева из шести узлов с оптимальными стоимостями поддеревьев $\tilde{F}^{(i)}$ и $\tilde{F}^{*(i)}$.

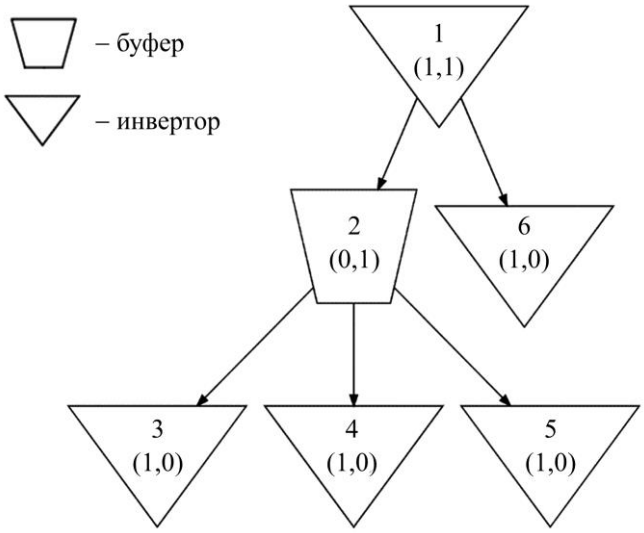


Рис. 6. Пример решения задачи $\mathcal{P}$ для буферного дерева из шести узлов с четырьмя терминальными узлами (листьями). В скобках указаны стоимости оптимальных решений подзадач $\mathcal{P}_i$ и $\mathcal{P}_i^*$

Fig. 6. A sample problem $\mathcal{P}$ solution for 6-node repeater tree with 4 sinks in the tree leaf nodes. The costs of optimal solutions to subproblems $\mathcal{P}_i$ and $\mathcal{P}_i^*$ are indicated in parentheses

Псевдокод алгоритма, реализующего изложенную стратегию с помощью рекурсивных процедур, имеет вид

```
// Локальные оптимизации поддеревьев:
//   z=(z[0],z[1]) – пара переменных для локальных подзадач с
//         положительной и отрицательной входными полярностями
//   x[] – массив пар локальных решений (0-инвертор, 1-буфер)
//   c[] – массив пар локальных стоимостей
function OPTIMIZE(узел i)
  // Вычисление суммарных стоимостей оптимальных поддеревьев
  cost = (0,0)
  foreach потомок j узла i do
    cost := cost + OPTIMIZE(j)  // поэлементная сумма
  // Решение для текущего узла
  if i – терминальный узел then
    x[i] := (1,0)
    c[i] := (1,0) + cost  // поэлементная сумма
  else
    if 1 + cost[0] < 0 + cost[1] then
      x[i][0] := 1
      c[i][0] := 1 + cost[0]
    else
      x[i][0] := 0
      c[i][0] := 0 + cost[1]
    if 1 + cost[1] < 0 + cost[0] then
      x[i][1] := 1
      c[i][1] := 1 + cost[1]
    else
      x[i][1] := 0
      c[i][1] := 0 + cost[0]
  return c[i]
end

// Формирование массива X[] глобального решения
function APPLY(узел i, входная полярность p)
  X[i] := x[i][p]
  foreach потомок j узла i do
    APPLY(j, (p ≡ X[i]))  // ≡ – логическая эквивалентность
  return c[i][p]
end

// Весь алгоритм: два этапа, решение
// записывается в X[], его стоимость – в C
OPTIMIZE(root)
C = APPLY(root, 0)
```

Поскольку алгоритм осуществляет два раза обход дерева в глубину, он имеет временну́ю и пространственные сложности $O(n)$, а также достаточно прост в рекурсивной реализации. Вычисляется оптимальное решение, часто значительно превосходящее по качеству решения известных эвристик (см. рис. 3). Данный алгоритм может быть обобщен для оптимизации более сложных целевых функций с различными ограничениями и параметрами, такими как размеры и мощность библиотечных буферных элементов, временны́е характеристики и пр.

Статистический анализ оптимальных буферных деревьев. Рассмотрим, насколько результаты полной оптимизации (оптимальные деревья) могут отличаться от тривиальных реализаций из всех буферов и от результатов простой оптимизации (все инверторы, кроме буферов у некоторых приемников). Результаты существенно зависят

от топологии дерева, теоретическая оценка здесь затруднена. Поэтому проведен вычислительный эксперимент:

– перебор всех неизоморфных корневых деревьев T_n с $n \le 20$ узлами (считаем равновероятными);

– выполнение простой и полной оптимизации каждого дерева;

– статистический анализ результатов.

В эксперименте $n \le 20$, так как число всех неизоморфных корневых деревьев растет экспоненциально с ростом числа узлов: $\left|\{T_n\}\right| = \Omega((2{,}955765...)^n n^{-3/2})$, т. е. увеличивается приблизительно в 3 раза при каждом следующем большом n [8, 9] (рис. 7).

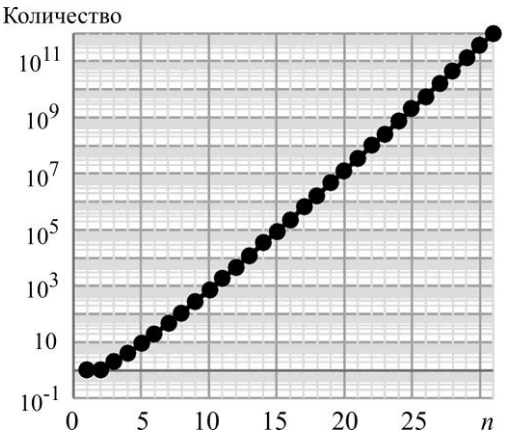


Рис. 7. Количество всех неизоморфных корневых деревьев с n узлами (логарифмический масштаб)

Fig. 7. The number of all non-isomorphic rooted trees with n nodes (logarithmic scale)

Для перебора использовался описанный в [10] линейный порядок на множестве деревьев, представленных в каноническом виде, и кодировка деревьев строками, как показано на рис. 8.

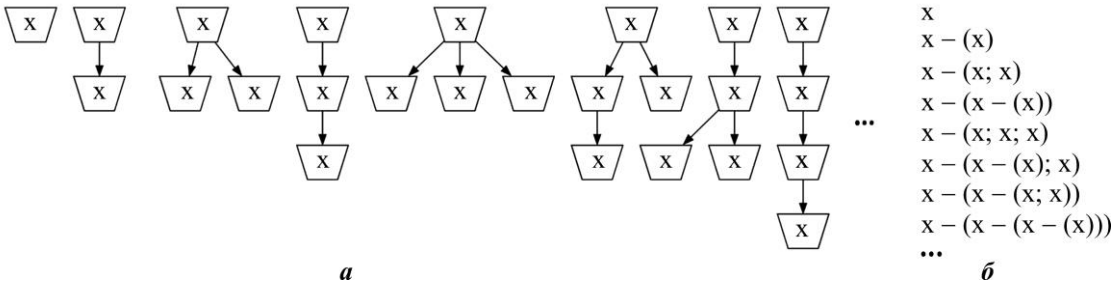


Рис. 8. Линейный порядок на множестве неизоморфных корневых деревьев в каноническом виде (*а*) и кодировка деревьев строками (*б*)

Fig. 8. Linear order on a set of non-isomorphic rooted trees shown in canonical form (*a*) and encoding trees with strings (*b*)

Линейный порядок задается индукцией по числу узлов [10]. $R_1 \prec R_2$ или $R_2 \succ R_1$ означает, что R_2 старше R_1, $R_1 \preceq R_2$ или $R_2 \succeq R_1$ означает, что R_1 не старше R_2. Пусть для всех деревьев с $k < n$ узлами линейный порядок уже определен. Пусть дерево R_1 содержит $n_1 \le n$ узлов, дерево R_2 содержит $n_2 \le n$ узлов, тогда если $n_1 < n_2$, то $R_1 \prec R_2$; если $n_1 = n_2$, то упорядочим поддеревья непосредственно под корнями R_1 и R_2: $B_1^1 \succeq B_2^1 \succeq ... \succeq B_p^1$ и $B_1^2 \succeq B_2^2 \succeq ... \succeq B_r^2$, далее упорядоченные списки сравниваются лексикографически.

Дерево представлено в каноническом виде, если потомки любого узла расположены в невозрастающем порядке порожденных ими поддеревьев [10]. Среди всех канонических деревьев с n узлами минимальным является звезда (граф $K_{1,n-1}$, бинарный код 10 10 ... 10), максимальным – цепь P_n (бинарный код 111...1000...0).

С учетом доступных вычислительных мощностей осуществлен перебор всех неизоморфных корневых деревьев с $n \le 20$ узлами. Тривиальные реализации буферных

деревьев используют 100 % (неинвертирующих) буферов. Простая эвристическая оптимизация заключалась в выборе всех инверторов, кроме отдельных буферов у приемников для исправления полярности. Полная оптимизация проводилась предложенным алгоритмом. Собранная статистика по доле буферов в результатах простой и полной оптимизации приведена на рис. 9 и 10. Начиная с четырехузловых деревьев, наблюдается значительное преимущество полной оптимизации перед простой: уменьшение ожидаемой доли буферов с 22 до 13 % (в 1,7 раза), максимальной доли буферов –

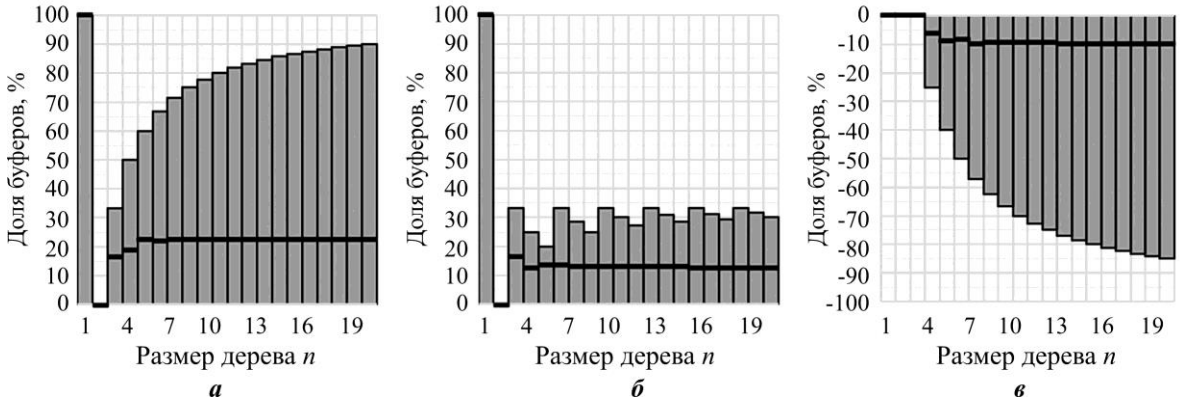


Рис. 9. Доля буферов при простой (*а*) и полной (*б*) оптимизации, уменьшение доли буферов при переходе от простой к полной оптимизации (*в*): ■ – диапазон значений; —— среднее значение. Терминальными узлами являются листья деревьев

Fig. 9. Buffer rate with simple optimization (*a*), buffer rate with full optimization (*b*), buffer rate reduction with full vs. simple optimization (*c*): ■ – range of values; —— average value. Terminal nodes are tree leaf nodes

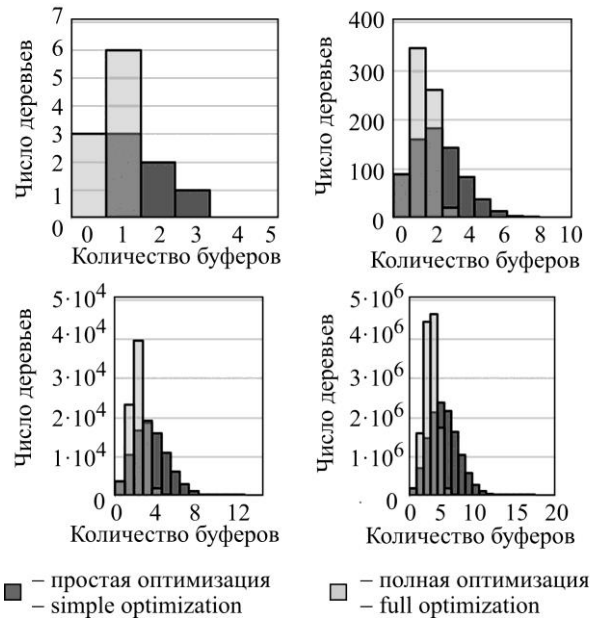


Рис. 10. Распределение числа 5-, 10-, 15-, 20-узловых деревьев по количеству буферов (перекрывающиеся гистограммы). Терминальными узлами являются листья деревьев

Fig. 10. Distributions of the numbers of 5-, 10-, 15-, 20-node trees by the number of buffers (overlapping histograms). Terminal nodes are tree leaf nodes

приблизительно с 90 до 30 % (в 3 раза). Для отдельно взятых деревьев среднее уменьшение доли буферов составляет 9 %, максимальное – до 85 %. Гистограммы распределения числа деревьев по количеству неинвертирующих буферов заметно сдвигаются влево.

В проведенном эксперименте предполагалось, что приемники сигнала подключены только к листьям буферного дерева. В случае подключения приемников к листьям и к некоторым внутренним узлам для соблюдения положительной полярности у приемников доля требуемых буферов может возрасти, а доля инверторов – снизиться (см. рис. 2 и 11).

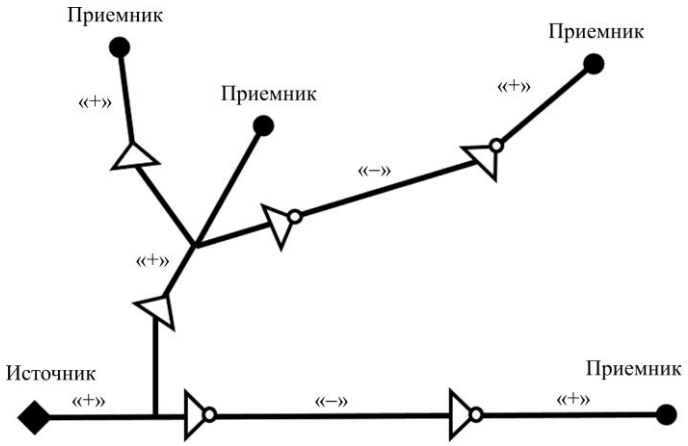


Рис. 11. Буферизация цепи с приемниками у листьев дерева и одного внутреннего узла
Fig. 11. Net buffering with sinks at the tree leaf nodes and one internal node

Проведен еще один вычислительный эксперимент, где для каждого дерева из предыдущего эксперимента с n узлами и l листьями сгенерировано 2^{n-l} вариантов с различными комбинациями внутренних терминальных узлов наравне с терминалами-листьями (рис. 12). Результаты приведены на рис. 13 и 14.

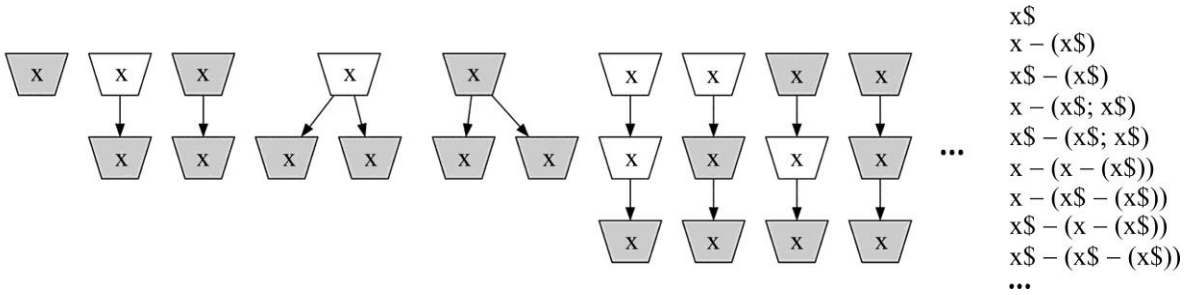


Рис. 12. Перебор корневых деревьев с различными комбинациями помеченных терминальных узлов (листья всегда терминальные)
Fig. 12. Rooted trees enumeration with various combinations of terminal nodes (leaf nodes are always terminal)

В данном эксперименте преимущество полной оптимизации перед простой уже не так выражено: начиная с четырехузловых деревьев, ожидаемая доля буферов уменьшается с 46,4 до 43,8 %, в худшем случае (все узлы терминальные) необходимо 100 % буферов. Для отдельно взятых деревьев среднее уменьшение доли буферов составляет 2,6 %, максимальное – по-прежнему до 85 %.

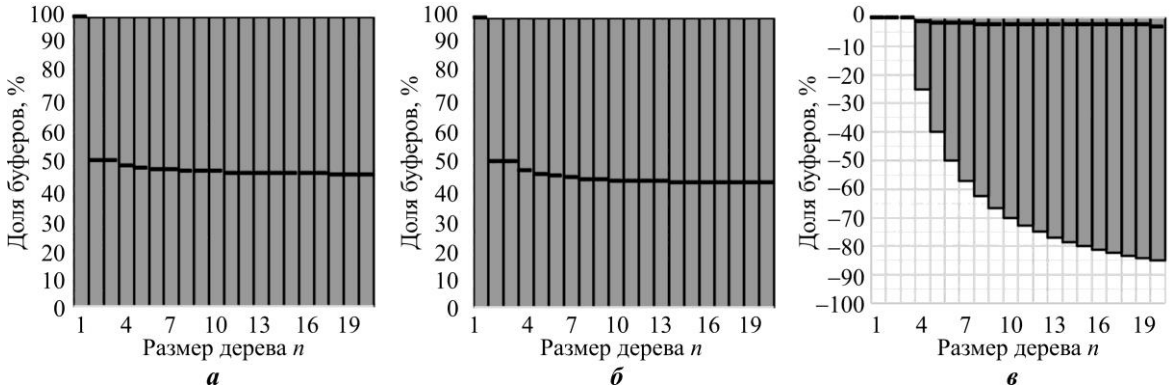


Рис. 13. Доля буферов при простой (*а*) и полной (*б*) оптимизации, уменьшение доли буферов при переходе от простой к полной оптимизации (*в*): ■ – диапазон значений; —— среднее значение. Терминальными узлами могут быть не только листья деревьев

Fig. 13. Buffer rate with simple optimization (*a*), buffer rate with full optimization (*b*), buffer rate reduction with full vs. simple optimization (*c*): ■ – range of values; —— average value. Terminal nodes can be not only tree leaf nodes

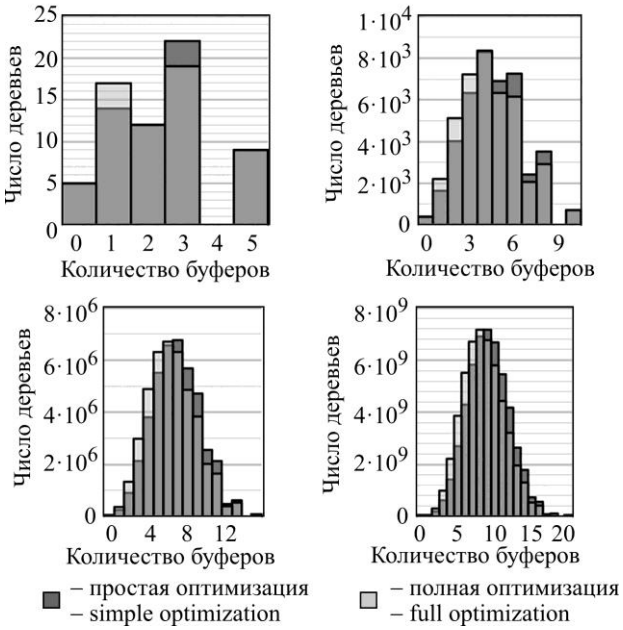


Рис. 14. Распределение числа 5-, 10-, 15-, 20-узловых деревьев по количеству буферов (перекрывающиеся гистограммы). Терминальными узлами могут быть не только листья деревьев

Fig. 14. Distributions of the numbers of 5-, 10-, 15-, 20-node trees by the number of buffers (overlapping histograms). Terminal nodes can be not only tree leaf nodes

Заключение. Предложенный эффективный алгоритм для оптимизации буферного дерева по числу буферов и инверторов основан на динамическом программировании. Алгоритм достаточно прост в рекурсивной реализации и может быть применен для оптимального выбора буферов и инверторов в первую очередь для сигнальных цепей в цифровых СБИС. В буферизации цепей синхронизации, скорее всего, понадобится использование иных подходов, учитывающих требования к сбалансированности деревьев для синхронности расписаний тактовых сигналов на приемниках.

Проведенный статистический анализ эффективности оптимальных решений в сравнении с простой оптимизацией (все инверторы, кроме буферов у отдельных приемников) показал значительное уменьшение доли буферов на деревьях с приемниками только у листьев: в среднем в 1,7 раза, максимум примерно в 3 раза. При наличии приемников у внутренних узлов преимущество предложенного алгоритма статистически уже не так заметно. На практике эффективность зависит от вероятностного распределения конкретных топологий буферных деревьев и требует проверки на реальных схемах.

Можно рекомендовать использование предложенного алгоритма в силу простоты его реализации и высокой производительности. Алгоритм может быть обобщен для оптимизации более сложных целевых функций с различными ограничениями и по разным параметрам, таким как размеры и мощность библиотечных буферных элементов, временны́е характеристики и пр.

Литература

1. ***Khursheed A., Khare K.*** Optimized buffer insertion for efficient interconnects designs // Int. J. Numer. Model. 2020. Vol. 33. Iss. 5. Art. ID: e2748. https://doi.org/10.1002/jnm.2748

2. ***Khursheed A., Khare K.*** Performance tuning of nano-interconnects using PSO optimized buffer insertion strategy // 2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET). Belgaum: IEEE, 2022. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/INCET54531.2022.9824640

3. ***Lee D., Markov I. L.*** Contango: Integrated optimization of SoC clock networks // 2010 Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE 2010). Dresden: IEEE, 2010. P. 1468–1473. https://doi.org/10.1109/DATE.2010.5457043

4. ***Ryzhenko N., Venger O.*** A practical repeater insertion flow // GLSVLSI'08: Proceedings of the 18th ACM Great Lakes Symposium on VLSI. Orlando, FL: ACM, 2008. P. 261–266. https://doi.org/10.1145/1366110.1366174

5. ***Лебедев И. Г., Корняков К. В., Мееров И. Б.*** Об одном алгоритме глобальной буферизации интегральных схем // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах: материалы XI Всерос. конф. (Н. Новгород, 01–03 нояб. 2011). Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2011. С. 187–192.

6. Graphviz: open source graph visualization software [Электронный ресурс]. URL: https://graphviz.org (дата обращения: 02.09.2024).

7. ***Cormen Th. H., Leiserson Ch. E., Rivest R. L., Stein C.*** Introduction to algorithms. 3rd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2009. 1292 p.

8. ***Otter R.*** The number of trees // Annals of Mathematics. 1948. Vol. 49. No. 3. P. 583–599. https://doi.org/10.2307/1969046

9. A000081. Number of unlabeled rooted trees with *n* nodes (or connected functions with a fixed point) // On-line Encyclopedia of Integer Sequences [Электронный ресурс]. Обновл.: 17.02.2024. URL: https://oeis.org/A000081 (дата обращения: 02.09.2024).

10. ***Диниц Е. А., Зайцев М. А.*** Алгоритмы генерации неизоморфных деревьев // Автом. и телемех. 1977. № 4. С. 121–126.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.04.2024 г.; принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторе

Малинаускас Костас Костович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kostas.malinauskas@org.miet.ru

References

1. Khursheed A., Khare K. Optimized buffer insertion for efficient interconnects designs. *Int. J. Numer. Model.*, 2020, vol. 33, iss. 5, art. ID: e2748. https://doi.org/10.1002/jnm.2748

2. Khursheed A., Khare K. Performance tuning of nano-interconnects using PSO optimized buffer insertion strategy. *2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET).* Belgaum, IEEE, 2022, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/INCET54531.2022.9824640

3. Lee D., Markov I. L. Contango: Integrated optimization of SoC clock networks. *2010 Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE 2010).* Dresden, IEEE, 2010, pp. 1468–1473. https://doi.org/10.1109/DATE.2010.5457043

4. Ryzhenko N., Venger O. A practical repeater insertion flow. *GLSVLSI'08: Proceedings of the 18th ACM Great Lakes Symposium on VLSI.* Orlando, FL, ACM, 2008, pp. 261–266. https://doi.org/10.1145/1366110.1366174

5. Lebedev I. G., Kornyakov K. V., Meyerov I. B. About an algorithm for global buffering of integrated circuits. *Vysokoproizvoditel'nyye parallel'nyye vychisleniya na klasternykh sistemakh,* proceedings of 11th Russia-wide conf. (N. Novgorod, Oct. 01–03, 2011). Nizhny Novgorod, Lobachevsky Univ. Publ., 2011, pp. 187–192. (In Russian).

6. *Graphviz: open source graph visualization software.* Available at: https://graphviz.org (access: 02.09.2024).

7. Cormen Th. H., Leiserson Ch. E., Rivest R. L., Stein C. *Introduction to algorithms.* 3rd ed. Cambridge, MA, MIT Press, 2009. 1292 p.

8. Otter R. The number of trees. *Annals of Mathematics,* 1948, vol. 49, no. 3, pp. 583–599. https://doi.org/10.2307/1969046

9. A000081. Number of unlabeled rooted trees with *n* nodes (or connected functions with a fixed point). *On-line Encyclopedia of Integer Sequences.* Last modified: 17.02.2024. Available at: https://oeis.org/A000081 (accessed: 02.09.2024).

10. Dinits E. A., Zaitsev M. A. Algorithms for generation of nonisomorphic trees. *Avtom. i telemekh.* = *Autom. Remote Control,* 1977, no. 4, pp. 121–126. (In Russian).

The article was submitted 20.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the author

Kostas K. Malinauskas – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Higher Mathematics-1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kostas.malinauskas@org.miet.ru

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

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

Научная статья
УДК 621.396.677
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-805-818
EDN: DJMPZJ

Методика оценки количества источников излучения в условиях амплитудно-фазовой неидентичности

***Е. А. Бабушкин*[1], *Р. В. Калашников*[1], *А. М. Лаврентьев*[1], *С. А. Зайцев*[2], *И. А. Смолев*[3]**

[1]*Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, г. Ярославль, Россия*
[2]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[3]*Главное управление кадров Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва, Россия*

bebs37@mail.ru

Аннотация. В условиях амплитудно-фазовой неидентичности каналов приема эффективность методов пеленгования источников излучения со «сверхразрешением» существенно снижается, что приводит к невозможности разрешать отдельные источники помехового излучения и осуществлять адекватное противопомеховое диаграммообразование. В то же время информация о количестве источников излучения содержится в спектре корреляционной матрицы сигналов. В работе на основании свойств собственных чисел и векторов корреляционной матрицы разработана методика оценки количественного состава группы источников излучения, не разрешаемых по угловым координатам, применительно к многофункциональным радиолокационным станциям с фазированной антенной решеткой проходного типа и решеткой облучателей с цифровым выходом. Путем численного моделирования проведена оценка эффективности методики. Результаты ее применения демонстрируют повышение вероятности достижения значения требуемого показателя помехоустойчивости от 0,5 до 0,95. Полученные результаты дополняют теорию адаптивной пространственной фильтрации, а их реализация позволяет повысить помехоустойчивость современных радиолокационных станций.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка проходного типа, алгоритм MUSIC, пеленгация источников излучения, помехоустойчивость

© Е. А. Бабушкин, Р. В. Калашников, А. М. Лаврентьев, С. А. Зайцев, И. А. Смолев, 2024

Для цитирования: Методика оценки количества источников излучения в условиях амплитудно-фазовой неидентичности / Е. А. Бабушкин, Р. В. Калашников, А. М. Лаврентьев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 805–818. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-805-818. – EDN: DJMPZJ.

Original article

Methodology for assessing the number of radiation sources under conditions of amplitude-phase non-identity

E. A. Babushkin[1], R. V. Kalashnikov[1], A. M. Lavrentyev[1], S. A. Zaitsev[2], I. A. Smolev[3]

[1]Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[3]Main Personnel Directorate of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia

bebs37@mail.ru

Abstract. Under conditions of amplitude-phase non-similarity of receiving channels, the effectiveness of methods of direction finding of radiating sources with “super-resolution” is significantly reduced, which leads to the inability to resolve individual sources of interference radiation and carry out adequate anti-interference diagram formation. At the same time, information about the number of radiating sources is contained in the spectrum of the signals correlation matrix. In this work, based on the properties of eigenvalues and vectors of the correlation matrix, a methodology has been developed for estimating the quantitative composition of a group of radiating sources unresolved by angular coordinates in relation to multifunctional radar stations with a pass-through phased array antenna and an array of feeds with a digital output. The developed methodology effectiveness was evaluated by numerical simulation. The methodology application results demonstrate an increase in the probability of achieving the required value of noise immunity indicator from 0.5 to 0.95. The results obtained complement the theory of adaptive spatial filtering, and their implementation allows the noise immunity improvement of modern radar stations.

Keywords: phased array system of feed-through type, MUSIC algorithm, radiating source direction finding, noise immunity

For citation: Babushkin E. A., Kalashnikov R. V., Lavrentyev A. M., Zaitsev S. A., Smolev I. A. Methodology for assessing the number of radiation sources under conditions of amplitude-phase non-identity. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 805–818. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-805-818. – EDN: DJMPZJ.

Введение. В настоящее время ввиду наличия большого числа источников помехового излучения естественного и искусственного происхождения к помехоустойчивости многофункциональных радиолокационных станций (МРЛС) предъявляются высокие требования. В [1, 2] отмечается низкая эффективность методов пространственной селекции, например автоматической компенсации помех (АКП) при условии превышения числа источников излучения (ИИ) над числом компенсационных каналов АКП. В работе [3]

представлена методика выделения из фазированной антенной решетки (ФАР) проходного типа элементарных излучателей для формирования дополнительных компенсационных антенн, которые по ширине сопоставимы с основным лучом, при условии незначительной программно-аппаратной доработки образца техники, заключающейся в применении дополнительных облучателей с цифровыми выходами. Однако для ориентации компенсационных лучей в направлении ИИ необходима априорная информация о помеховой обстановке [3]. Исходя из этого, для повышения помехоустойчивости современных МРЛС с проходной ФАР необходимо совершенствование способов пеленгования ИИ.

Цель настоящей работы – разработка методики повышения помехоустойчивости МРЛС с ФАР проходного типа.

Постановка задачи. Количественной мерой помехоустойчивости МРЛС является коэффициент сжатия зоны обнаружения (КСЗО), который показывает, во сколько раз уменьшается дальность обнаружения целей в условиях помех по сравнению с беспомеховой обстановкой. С учетом работы АКП данный коэффициент может быть выражен из своего определения [4] и уравнения противорадиолокации:

$$\text{КСЗО} = \frac{D_{\text{п}}}{D_0} = \sqrt[4]{\frac{K_{\text{п}}}{K_{\text{п}} + \dfrac{\overline{Y_{0\text{п}}^2}}{N_0}}}, \qquad (1)$$

где $D_{\text{п}}$ – дальность обнаружения целей при наличии помех; D_0 – дальность обнаружения целей в отсутствие помех; $K_{\text{п}}$ – коэффициент подавления помехи, который показывает, во сколько раз помеха на выходе $\overline{Y_{\Sigma\text{п}}^2}$ АКП меньше помехи на входе $\overline{Y_{0\text{п}}^2}$; N_0 – спектральная мощность собственного шума приемника.

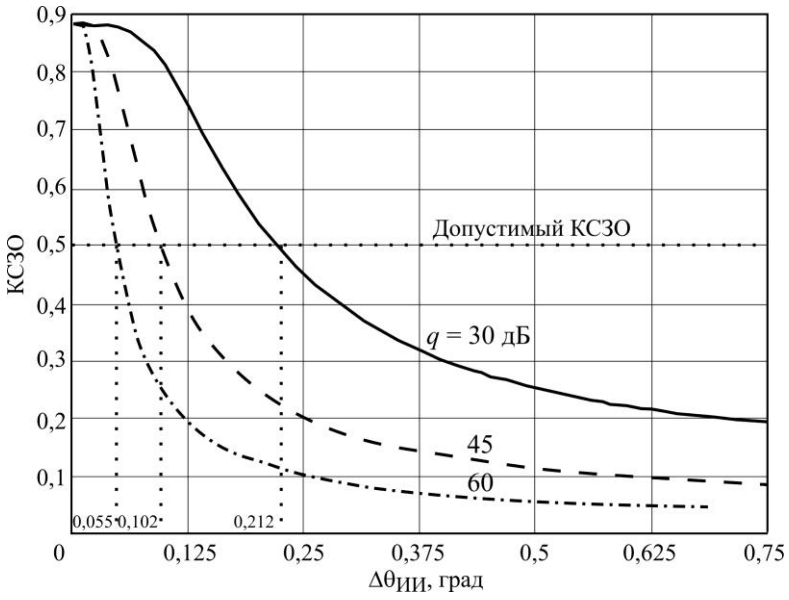


Рис. 1. Зависимость КСЗО МРЛС с одноканальной АКП от углового расстояния $\Delta\theta_{\text{ИИ}}$ между двумя источниками помехового излучения для заданных отношений помеха / шум

Fig. 1. Dependence of the compression coefficient of the detection zone of a multifunctional radar station with a single-channel automatic interference compensator on the angular distance $\Delta\theta_{\text{ИИ}}$ between two sources of interference radiation for given interference-to-noise ratios

Известна зависимость между коэффициентом подавления одноканального АКП при воздействии двух равных по мощности помех от их углового сближения [1]. С учетом непосредственной связи между коэффициентом подавления АКП и КСЗО МРЛС (1) рассчитана зависимость КСЗО МРЛС с одноканальной АКП от углового расстояния между двумя источниками помехового излучения для заданных отношений помеха / шум (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что правильная оценка числа ИИ должна осуществляться даже для близко расположенных ИИ, угловое рассогласование которых меньше ширины компенсационного луча, иначе будет приниматься решение о назначении одного компенсационного канала в направлении двух ИИ, что приведет к снижению КСЗО до недопустимых значений. Таким образом, возникает необходимость пеленгации ИИ со «сверхразрешением» для достижения помехоустойчивости МРЛС не ниже допустимой. Наличие решетки из облучателей с цифровыми выходами позволяет использовать алгоритмы пеленгования со «сверхразрешением», так как она является эквивалентом цифровых антенных решеток, в которых задача пеленгования со «сверхразрешением» широко изучена [5, 6].

Для проверки возможности достижения помехоустойчивости не ниже допустимой использована модель проходной ФАР с десятью облучателями с аналого-цифровым преобразованием принимаемых сигналов (рис. 2, *а*). Расстояние между облучателями $d/\lambda = 1$, рассмотрено воздействие трех ИИ в азимутальной плоскости. Моделирование проведено в программной среде Matlab.

Модель сигналов, принимаемых решеткой облучателей, может быть представлена в виде

$$\mathbf{Y} = \sum_{s=1}^{S} \mathbf{F}(\theta_s)\mathbf{X}_s + \mathbf{n},$$

где $\mathbf{F}(\theta_s) = | F_0(\theta_s), F_1(\theta_s), ..., F_p(\theta_s), ..., F_{10}(\theta_s) |^T$ – вектор-столбец значений амплитудно-фазового распределения на решетке облучателей, формируемого *s*-м ИИ; $\mathbf{X}_s = | x_{s0}, x_{s1}, ..., x_{sK} |$ – вектор-строка дискретных отсчетов комплексной амплитуды сигнала, создаваемого *s*-м ИИ; *K* – число отсчетов сигнала; **n** – матрица $10 \times K$ собственного шума в каналах.

Расчеты проводили исходя из допущения отсутствия корреляции между помехами и шумами, а также равенства мощностей собственных шумов в каналах приема: $\overline{\mathbf{X}_s \mathbf{X}_s^H} = \sigma_s^2$, $\overline{\mathbf{n}\mathbf{n}^H} = \sigma_0^2 \mathbf{E}$, где **E** – единичная матрица. При таких допущениях и условии бесконечного коэффициента накопления $K \to \infty$ корреляционная матрица помех **M** может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{M} = \overline{\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H} = \sum_{s=1}^{S} \sigma_s^2 \frac{\mathbf{F}(\theta_s)\mathbf{F}(\theta_s)^H}{\left|\mathbf{F}(\theta_s)^H \mathbf{F}(\theta_s)\right|} + \sigma_0^2 \mathbf{E}.$$

По определению корреляционная матрица является положительно полуопределенной и обладает свойством эрмитовости, что позволяет представлять ее в виде разложения:

$$\mathbf{M} = \sum_{s=1}^{S} \mu_s \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H + \sum_{n=1}^{10-S} \mu_n \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H, \qquad (2)$$

где $\mu_{s,n}$ – собственные числа корреляционной матрицы, которые находятся из выражения $\det | \mathbf{M} - \mu_{s,n} \mathbf{E} | = 0$; $\mathbf{U}_{s,n}$ – собственные векторы корреляционной матрицы, которые находятся из соотношения $\mathbf{M}\mathbf{U}_{s,n} = \mu_{s,n}\mathbf{U}_{s,n}$.

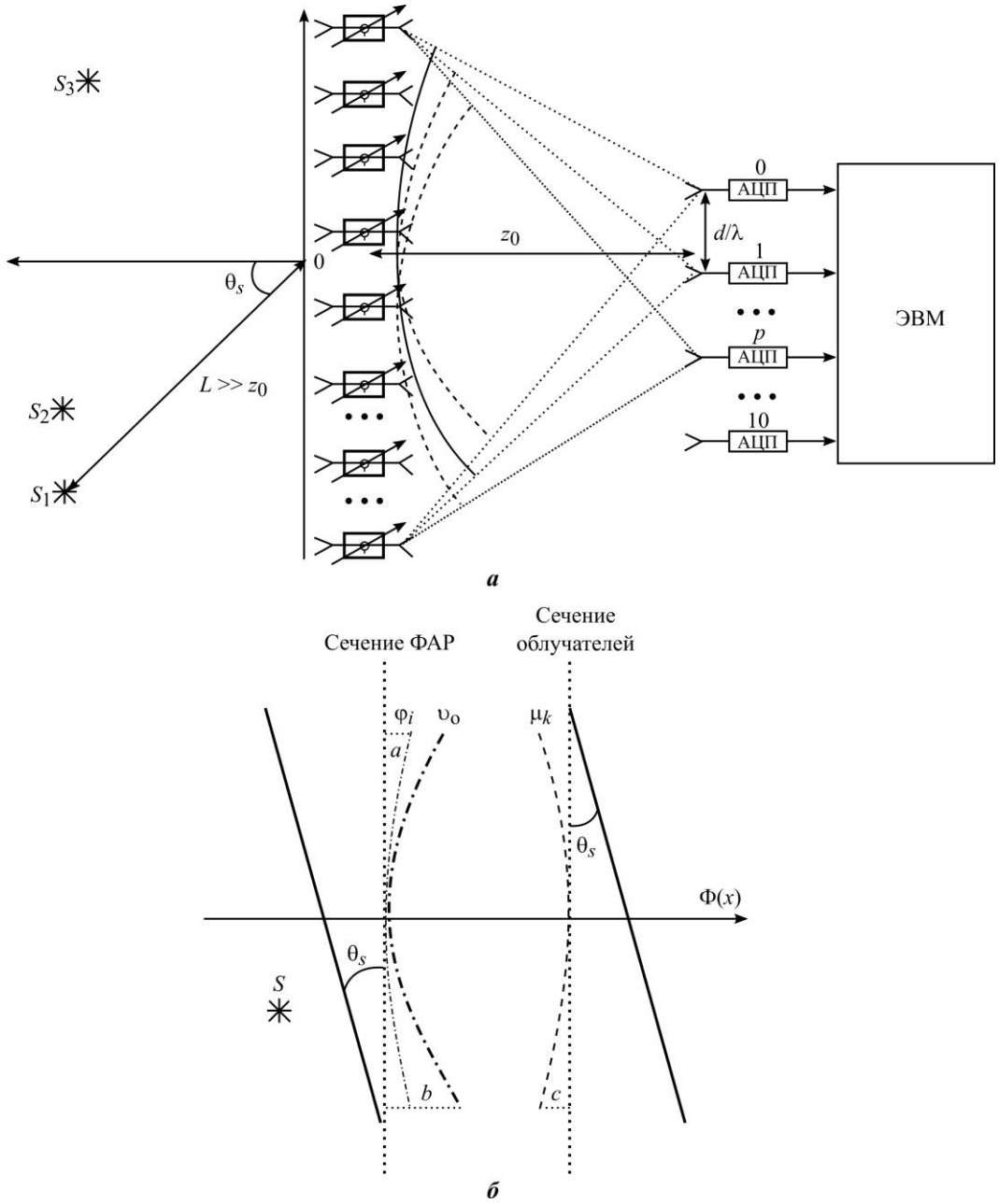


Рис. 2. Модель проходной ФАР с десятью облучателями с цифровыми выходами (*а*) и пояснение к возникновению фазовых искажений в ФАР (*б*)
Fig. 2. Model of a pass-through phased array system with 10 feeds with digital outputs (*a*) and explanation of the occurrence of phase distortions in such a phased array system (*b*)

Разделение собственных чисел и собственных векторов на сигнальные ($\mathbf{U}_s$, μ_s) и шумовые ($\mathbf{U}_n$, μ_n) – нетривиальная задача, решаемая на практике путем сравнения собственных чисел корреляционной матрицы с неким порогом [5].

На разделении собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы на шумовые и сигнальные основан алгоритм пеленгования со «сверхразрешением» MUSIC [5, 6]:

$$Q_n(\beta) = \frac{1}{\mathbf{V}(\beta)\mathbf{P}_n\mathbf{V}(\beta)^H}, \quad (3)$$

где $Q_n(\beta)$ – элементы пространственного спектра (значения эрмитовых форм); $\mathbf{V}(\beta) = |V_1(\beta), V_2(\beta), ..., V_p(\beta), ..., V_{10}(\beta)|$ – вектор-гипотеза; $\mathbf{P}_n = \mathbf{E} - \sum_{s=1}^{S} \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H = \sum_{n=1}^{10-S} \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H$ – пространство, натянутое на шумовые собственные векторы корреляционной матрицы (шумовое подпространство).

Рассмотрим воздействие ИИ в соответствии со следующими условиями: $S = 3$; мощности помех, нормированные к уровню собственного шума, равны и составляют $\sigma_s^2/\sigma_0^2 = 30$ дБ; направления воздействия заданы вектором $\boldsymbol{\theta} = |–5{,}1^\circ, 5{,}1^\circ, 5{,}28^\circ|$; вектор амплитудно-фазового распределения выражается как $F_p(\theta_s) = \exp[-j2\pi p \cdot \sin(\theta_s)]$, где $p = [1…10]$; преобразование Фурье от амплитудно-фазового распределения представляет собой диаграмму направленности антенны с шириной главного максимума $\Delta\theta_{гл} = 5{,}1^\circ$. Пространственный спектр, рассчитанный по (3) в заданных условиях, представлен на рис. 3. Видно, что в заданных условиях неограниченного накопления сигнала и при отсутствии амплитудно-фазовых ошибок алгоритм MUSIC позволяет обеспечить требуемую разрешающую способность и точность пеленгования. В идеальных условиях данный алгоритм позволяет достичь заданного КСЗО.

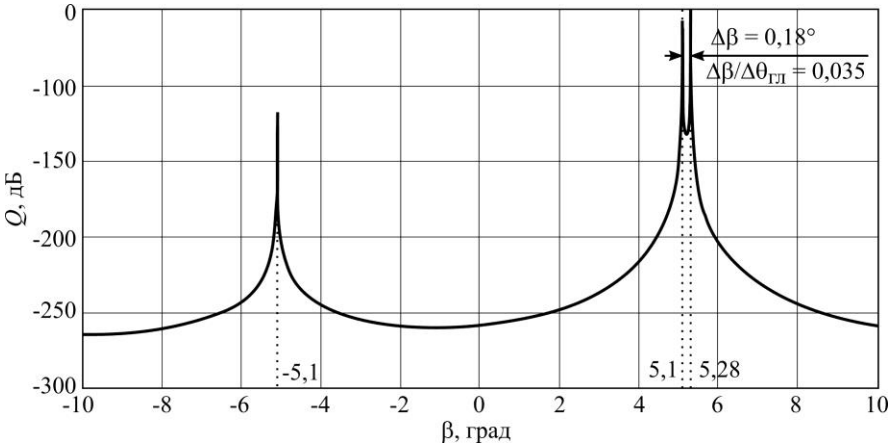


Рис. 3. Элементы пространственного спектра в условиях воздействия трех ИИ
Fig. 3. Elements of the spatial spectrum under the influence of three radiation sources

Разработка методики оценки количественного состава группы ИИ. На практике в каналах приема неизбежны амплитудно-фазовые ошибки, а коэффициент накопления ограничен. Известно [7], что наличие ФАР перед решеткой из облучателей с цифровыми выходами приводит к возникновению фазовых ошибок, связанных с разностью хода волн от каждого элемента ФАР до облучателей $\boldsymbol{\upsilon}$, а при наличии фазового распределения на элементах ФАР $\boldsymbol{\varphi}$ оно также искажает фронт падающей волны (рис. 2, *б*), который перестает быть плоским. Такие ошибки устраняются путем фазовой корректировки каналов $\boldsymbol{\mu}$ [8]. В работе [7] также показано существование амплитудной неидентичности каналов, которая носит случайный характер и не может быть скорректирована, а ее значение имеет порядок $\sigma_A^2 = |\overline{F_0(\theta_s)/F_p(\theta_s)}| \approx 10^{-4}$.

Применим алгоритм пеленгования MUSIC в условиях конечного коэффициента накопления и присутствия амплитудных ошибок. Конечность накопления сигнала приводит к необходимости использования вместо точной корреляционной матрицы ее максимально правдоподобной оценки [2, 5]:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2K}\mathbf{Y}\mathbf{Y}^{H}. \qquad (4)$$

При расчетах приняты следующие условия: $S = 3$; направления заданы вектором $\boldsymbol{\theta} = |{-5{,}1}^{\circ},\ 5{,}1^{\circ},\ 5{,}28^{\circ}|$; мощности помех равны и составляют $\sigma_s^2/\sigma_0^2 = 30$ дБ; вектор амплитудно-фазового распределения включает в себя элемент случайной амплитуды в каналах $F_p(\theta_s) = (A_{\text{ош}} + 1)\cdot\exp[-j2\pi p\cdot\sin(\theta_s)]$, где $A_{\text{ош}}$ – случайная величина ошибки, распределенной по нормальному закону, с нулевым математическим ожиданием и дисперсией ошибки $\sigma_{\text{ош}}^2 = 10^{-4}$. При расчете оценки корреляционной матрицы коэффициент накопления $K = 50$.

В заданных условиях получена оценка корреляционной матрицы (4) и выполнено ее разложение на собственные числа и собственные векторы (2). Путем сравнения с порогом ($l \geq \sigma_0^2$) [9] определены сигнальные собственные числа, количество которых соответствует количеству ИИ ($N(\mu_s) = S = 3$) и найдено шумовое подпространство. С помощью алгоритма MUSIC сформирован пространственный спектр (рис. 4).

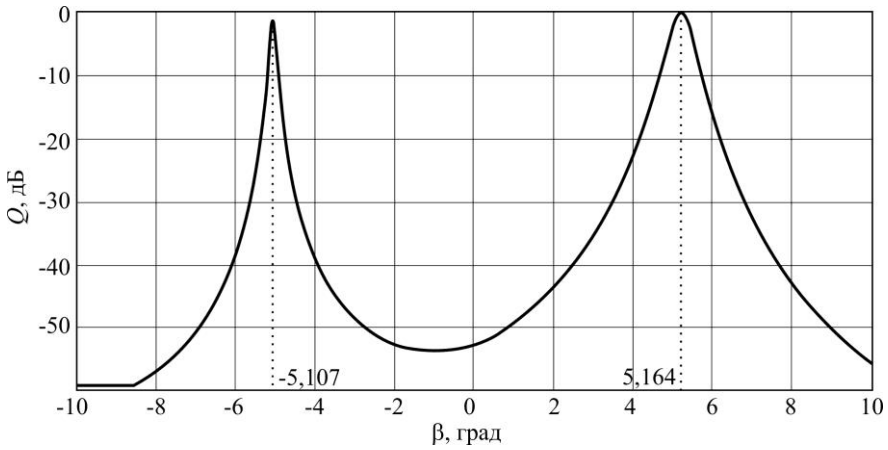


Рис. 4. Элементы пространственного спектра в условиях воздействия трех ИИ и при наличии амплитудной неидентичности каналов
Fig. 4. Elements of the spatial spectrum under the influence of three radiation sources and the presence of amplitude non-identity of the channels

Полученные расчеты подтверждают известные из литературы [5, 8] особенности поведения большинства алгоритмов пеленгования со «сверхразрешением» в условиях наличия амплитудных ошибок, а именно снижение и «слипание» отдельных максимумов пространственного спектра и несоответствие их положения точным пеленгам ИИ. Следовательно, в представленных условиях алгоритм MUSIC не позволяет обеспечить требуемую разрешающую способность пеленгования и, соответственно, заданный КСЗО. В то же время, несмотря на наличие ограничивающих факторов, оценка числа ИИ осуществлена безошибочно, что также подтверждает известные теоретические утверждения [10] о более высокой разрешающей способности определения количества ИИ некоординатными методами. Это связано с тем, что на собственные числа амплитудно-фазовые ошибки влияния не оказывают. Поскольку оценки количества максимумов пространственного спектра и числа ИИ не совпадают, возникает задача определе-

ния количественного состава группы ИИ, не разрешаемых по угловым координатам, в условиях амплитудно-фазовой неидентичности каналов приема.

Для решения данной задачи необходимо рассмотреть некоторые свойства собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы, а также особенности поведения алгоритма MUSIC, известные из литературы [5].

Свойство 1. Сигнальные собственные числа зависят от мощностей помех $\sigma_{\text{п}}^2$ и степени коллинеарности векторов амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве от ИИ, а их сумма равна суммарной мощности помех. Для двух ИИ сигнальные собственные числа корреляционной матрицы будут равны сумме и разности мощностей помех с учетом степени угловой близости ИИ (рис. 5). Если несколько сопоставимых по энергетическому потенциалу ИИ действуют с близких угловых направлений и их спектры не разрешаются, то наименьшее сигнальное собственное число будет соответствовать одному из этих неразрешаемых ИИ.

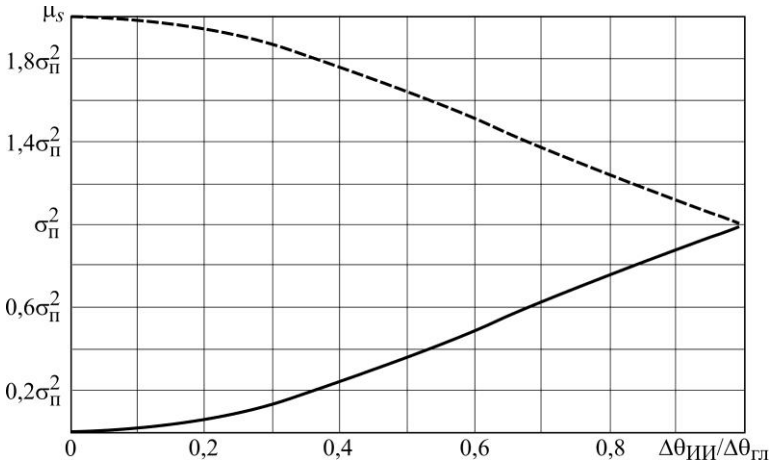


Рис. 5. Зависимость сигнальных собственных чисел корреляционной матрицы μ_s от степени взаимной коллинеарности векторов АФР $\Delta\theta_{\text{ИИ}} / \Delta\theta_{\text{гл}}$, формируемых ИИ: —— наибольшее сигнальное собственное число; – – – второе по уровню сигнальное собственное число

Fig. 5. Dependence of the magnitude of the signal eigenvalues of the correlation matrix μ_s on the degree of mutual collinearity of the amplitude-phase distribution vectors $\Delta\theta_{\text{ИИ}} / \Delta\theta_{\text{гл}}$ formed by the radiation sources: —— largest signal eigenvalue; – – – second-highest signal eigenvalue

Свойство 2. Сигнальные собственные векторы корреляционной матрицы являются линейными комбинациями векторов амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве от ИИ. Сигнальные собственные векторы корреляционной матрицы для некоррелированных векторов амплитудно-фазового распределения будут коллинеарны этим распределениям, а собственные векторы для коррелированных амплитудно-фазовых распределений будут иметь более сложную конфигурацию, составленную из этих векторов амплитудно-фазового распределения (рис. 6).

Свойство 3. Все собственные векторы корреляционной матрицы взаимно ортогональны. При расширении шумового подпространства за счет сигнального собственного вектора ($\mathbf{U}_s$), на который опирался вектор амплитудно-фазового распределения $\dfrac{\mathbf{F}(\theta_s)}{|\mathbf{F}(\theta_s)|}$, максимум в направлении $\beta_{\max i}$ на пространственном спектре, построенном по алгоритму MUSIC (3), не сформируется (рис. 7).

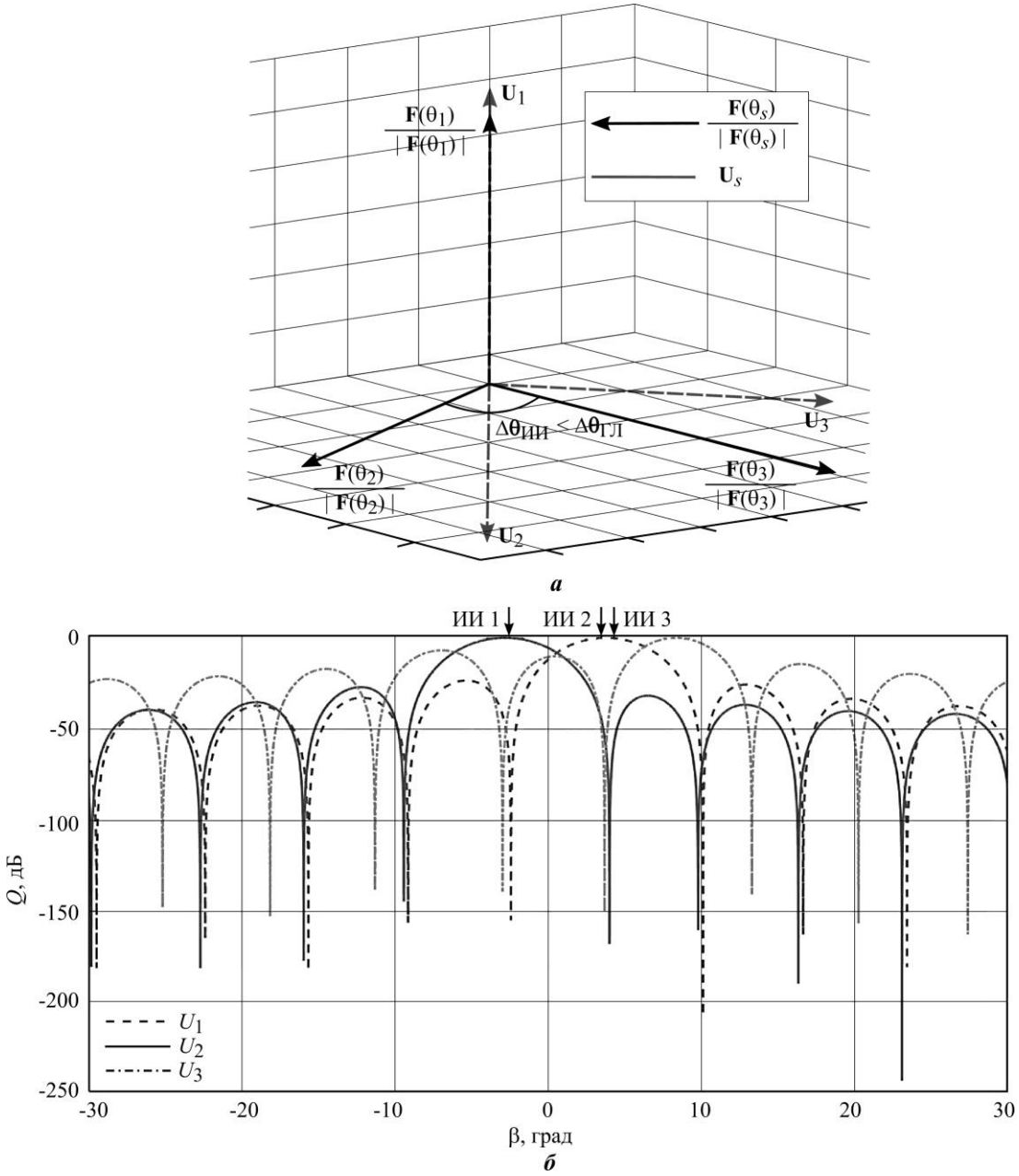


Рис. 6. Ориентация собственных векторов корреляционной матрицы и вектора АФР, формируемого ИИ (*а*), и преобразование Фурье от этих векторов (*б*)

Fig. 6. Orientation of the eigenvectors of the correlation matrix and the vector of the amplitude-phase distribution formed by the radiation sources (*a*) and fourier transform of the eigenvectors of the correlation matrix (*b*)

Таким образом, на основании свойств 1–3 предлагается при невозможности разрешить ИИ по пространственному спектру выполнять итерационную процедуру последовательного отнесения сигнальных собственных векторов, соответствующих наименьшим сигнальным собственным числам, к шумовому подпространству (свойство 1) и определять, какой из максимумов пространственного спектра подвергся наибольшему изменению. Этому максимуму будет соответствовать группа ИИ (свойства 2, 3). Коли-

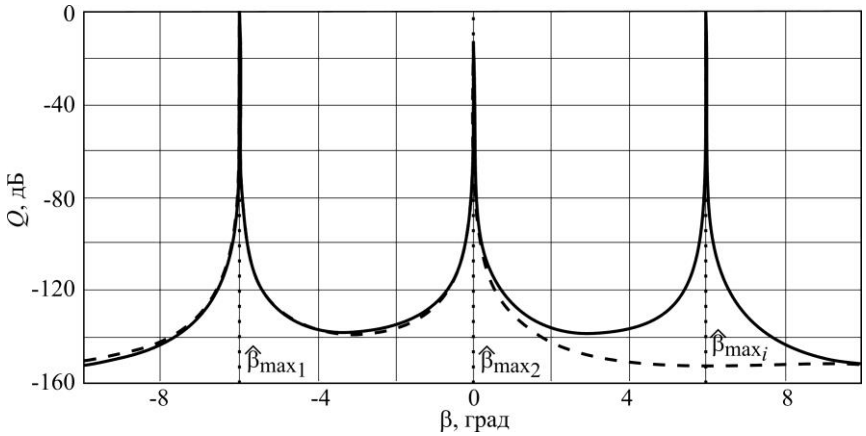


Рис. 7. Исходный пространственный спектр (——) и спектр при изменении размера шумового подпространства (– – –)
Fig. 7. Original spatial spectrum (——) and spectrum with changing noise subspace size (– – –)

чественной мерой искажения элементов пространственного спектра может быть коэффициент линейной корреляции:

$$\rho_{ni}(Q_{ni}, Q_{n-1i}) = \frac{\mathrm{cov}(Q_{ni} Q_{n-1i})}{\sigma_{Q_{ni}} \sigma_{Q_{n-1i}}}, \qquad (5)$$

где cov(·) – оператор вычисления математического ожидания; Q_{ni}, Q_{n-1i} – элементы пространственного спектра, содержащие *i*-е стробированные максимумы размером ($\alpha_{\text{стр}} = 0{,}9^\circ$); $\sigma_{Q_{ni}}$, $\sigma_{Q_{n-1i}}$ – среднеквадратическое отклонение элементов пространственного спектра, содержащих *i*-е стробированные максимумы.

Исходя из данных предположений, сформируем пространственный спектр по алгоритму MUSIC в заданных условиях, но на основе шумового подпространства из трех шумовых собственных векторов ($\mathbf{P}_0 = \Sigma_{n=1}^{3} \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H$) и трех шумовых с одним сигнальным собственным вектором ($\mathbf{P}_1 = \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H + \Sigma_{n=1}^{3} \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H$) (рис. 8).

Из графика на рис. 8 следует, что при формировании пространственного спектра с учетом расширения шумового подпространства один из пиков изменился по ширине и положению максимального значения по сравнению с исходным пространственным спектром. Этот пик соответствует группе ИИ, а пик, соответствующий одиночному ИИ, практически неотличим от исходного. Коэффициенты линейной корреляции стробов пространственного спектра $\rho_1 = 0{,}998$ для одиночного ИИ и $\rho_2 = 0{,}931$ для группы ИИ. Учитывая число ИИ, полученных по некоординатной информации, можно утверждать, что максимуму $\beta_{\max 1} = -5{,}107^\circ$ соответствует одиночный ИИ, а максимуму $\beta_{\max 2} = 5{,}164^\circ$ – группа ИИ с количественным составом, равным $S - 1$, т. е. 2.

На основании этого можно сформулировать методику оценки количественного состава группы ИИ, не разрешаемых по угловым координатам, в условиях амплитудно-фазовой неидентичности каналов приема:

1. Многоканальный прием сигналов **Y**.

2. Максимально правдоподобная оценка корреляционной матрицы **M**.

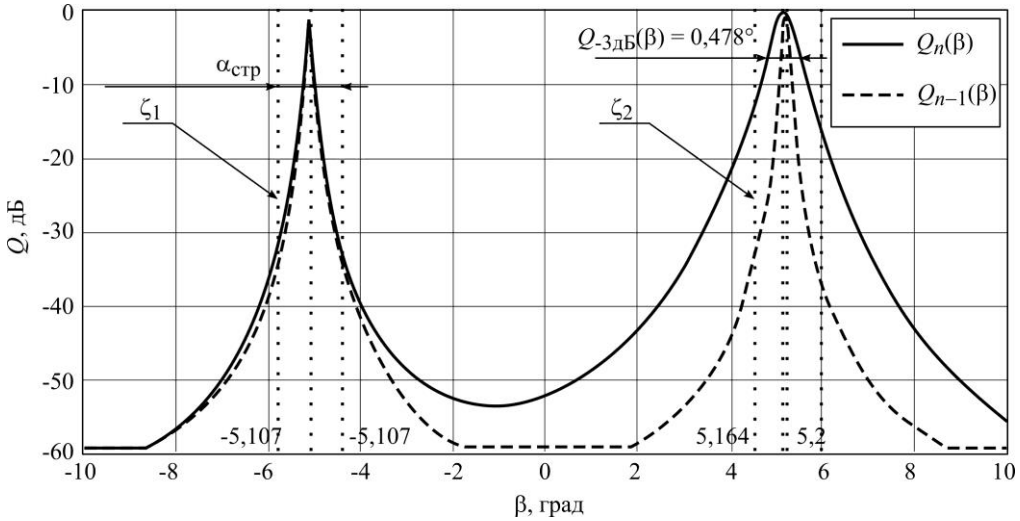


Рис. 8. Элементы пространственного спектра для трех ИИ в условиях амплитудных ошибок в каналах приема при разном размере шумового подпространства
Fig. 8. Elements of the spatial spectrum for three radiation sources under conditions of amplitude errors in receiving channels with different sizes of the noise subspace

3. Разложение корреляционной матрицы на собственные числа и собственные векторы $\mu_{s,n}$, $\mathbf{U}_{s,n}$.

4. Сравнение с порогом собственных чисел корреляционной матрицы для разделения на шумовые и сигнальные ($\mu_s > l$).

5. Оценка числа ИИ ($S = N(\mu_s)$).

6. Выделение шумовых собственных векторов корреляционной матрицы в шумовое подпространство $\mathbf{P}_0$.

7. Формирование пространственного спектра $Q_n(\beta)$ в соответствии с алгоритмом MUSIC.

8. Оценка количества $N(\beta_{\max i})$ и положений максимумов пространственного спектра $\beta_{\max i}$.

9. Определение количества не разрешаемых по угловым координатам ИИ: $N_{\text{неразр}} = S - N(\beta_{\max i})$.

10. Выполнение итерационной процедуры оценки количества ИИ в группе:

– формирование расширенной матрицы проектора на шумовое подпространство $\mathbf{P}_n$ согласно выражению

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{E} - \sum_{s=1}^{S} \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H + \sum_{s=1}^{n} \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H ,$$

где $n = 1 \ldots N_{\text{неразр}}$ – количество отнесенных к шумовому подпространству сигнальных собственных векторов корреляционной матрицы при условии, что все собственные числа расположены по возрастанию;

– расчет элементов пространственного спектра $Q_n(\beta)$ на основе шумового подпространства $\mathbf{P}_n$ с учетом его расширения за счет сигнального собственного вектора, относящегося к *n*-му наименьшему сигнальному собственному числу;

– стробирование элементов пространственного спектра $Q_{ni}(\beta)$:

$$Q_{ni}(\beta\zeta) = Q_n(\beta)\zeta_i,$$

где $\zeta_i = \mathrm{rect}(\beta_{\max i}, \alpha_{\text{стр}})$ – *i*-й угловой строб в направлении $\beta_{\max i}$ размером $\alpha_{\text{стр}}$;

– вычисление коэффициентов линейной корреляции стробированных спектров $\rho_{n\,i}$ (5) при $n = 1$, $Q_{n-1i} = Q_i$;

– для *i*-го стробированного пространственного спектра, коэффициент линейной корреляции которого ρ_{ni} минимален, присвоение оценки количества ИИ на единицу больше;

– выполнение итерационной процедуры для $n \le N_{\text{неразр}}$.

Поскольку при расчетах используется оценка корреляционной матрицы, то результаты, получаемые согласно методике, носят вероятностный характер. Для оценки эффективности методики проведен численный эксперимент на модели в заданных условиях: $S = 3$; $\boldsymbol{\theta} = |{-5{,}1}^\circ,\ 5{,}1^\circ,\ \theta_3|$; $\theta_3 = [5{,}11^\circ \ldots 5{,}96^\circ]$; $\sigma_s^2/\sigma_0^2 = 30$ дБ; амплитудно-фазовое распределение задается выражением $F_p(\theta_s) = (A_{\text{ош}} + 1)\cdot\exp[-j2\pi p\cdot\sin(\theta_s)]$; $p = [1 \ldots 10]$; $\sigma^2_{\text{ош}} = 10^{-4}$ с нулевым математическим ожиданием; $K = 50$; $\alpha_{\text{стр}} = 0{,}9^\circ$. По результатам эксперимента получена зависимость вероятности определения истинного количества ИИ в группе от углового расстояния между ними ($\Delta\theta_{\text{ИИ}} = 5{,}1^\circ - \theta_3$) (рис. 9).

Согласно рис. 9 применение предложенной методики в заданных условиях позволяет обеспечить КСЗО МРЛС не ниже заданного с вероятностью 0,93–0,95.

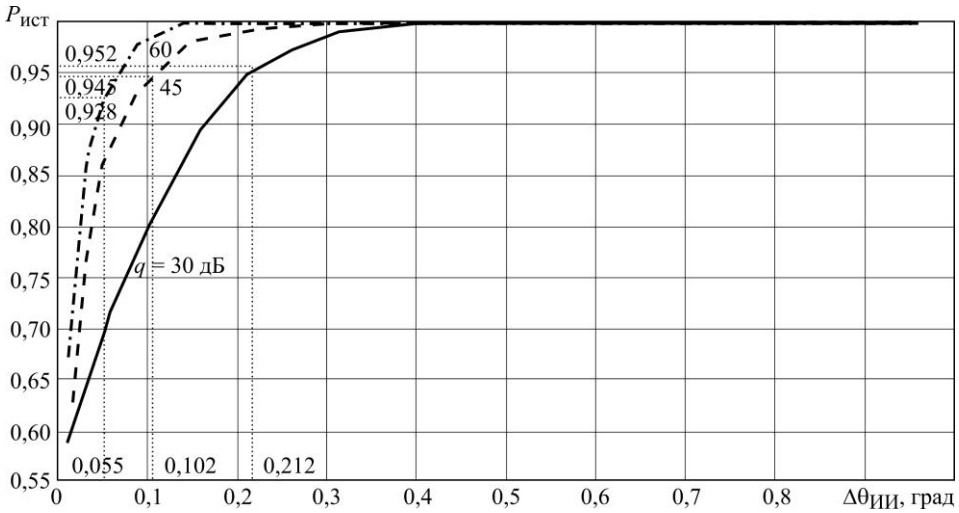


Рис. 9. Зависимость вероятности определения истинного количества ИИ $P_{\text{ист}}$ в группе от углового расстояния между ними $\Delta\theta_{\text{ИИ}}$

Fig. 9. Dependence of the probability of determining the true number of radiation sources $P_{\text{ист}}$ in a group on the angular distance between them $\Delta\theta_{\text{ИИ}}$

Заключение. Совершенствование методов пеленгования, в частности оценка количества ИИ, позволяет добиться повышения помехоустойчивости МРЛС. Предложенная методика оценки количественного состава группы ИИ, не разрешаемых по угловым координатам, в условиях амплитудно-фазовой неидентичности каналов приема, основанная на особенностях поведения собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы при изменении степени взаимной коллинеарности векторов АФР поля от ИИ в раскрыве антенной решетки, показала свою эффективность. Данная методика позволяет повысить вероятность обеспечения допустимого КСЗО МРЛС от 0,5 до 0,95.

Литература

1. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / под ред. ***Ю. И. Лосева***. М.: Радио и связь, 1988. 207 с.

2. ***Монзинго Р. А., Миллер Т. У.*** Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / пер. с англ. под ред. В. А. Лексаченко. М.: Радио и связь, 1986. 446 с.

3. ***Калашников Р. В.*** Методика выделения из круглой ФАР просветно-линзового типа элементарных излучателей для формирования дополнительных компенсационных антенн // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2018. Т. 8. № 1. С. 71–75. EDN: YTHBPF.

4. Справочник офицера воздушно-космической обороны / под общ. ред. ***С. К. Бурмистрова***. Тверь: ВА ВКО, 2006. 564 с.

5. ***Ратынский М. В.*** Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 197 с.

6. ***Hayes M. H.*** Statistical digital signal processing and modeling. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1996. 624 p.

7. ***Бабушкин Е. А., Калашников Р. В., Лаврентьев А. М.*** Методика пеленгации постановщиков активных помех в многофункциональных радиолокационных станциях с фазированной антенной решеткой проходного типа // Радиолокация: Теория и практика. М.: Юнити-Дана, 2023. С. 73–87. EDN: NRGVZV.

8. ***Buyn G., Choo H.*** A novel approach to array manifold calibration using single-direction information for accurate direction-of-arrival estimation // IEEE Trans. Antennas Propag. 2017. Vol. 65. No. 9. P. 4952–4957. https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2731374

9. ***Петров С. В.*** Синтез и анализ алгоритмов обнаружения стохастических сигналов в системах с многоэлементной антенной решеткой // Антенны. 2015. № 7 (218). С. 29–36. EDN: UIWAOP.

10. ***Lee H., Li F.*** Quantification of the difference between detection and resolution thresholds for multiple closely spaced emitters // IEEE Trans. Signal Process. 1993. Vol. 41. No. 36. P. 2274–2277. https://doi.org/10.1109/78.218159

Статья поступила в редакцию 20.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 29.07.2024 г.;
принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Бабушкин Евгений Александрович – адъюнкт штатной адъюнктуры Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны (Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр-т, 28), bebs37@mail.ru

Калашников Роман Васильевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиотехнических систем Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны (Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр-т, 28), karomm12@mail.ru

Лаврентьев Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, начальник кафедры радиотехнических систем Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны (Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр-т, 28), alexalawrentew24@icloud.com

Зайцев Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиолокационных станций и автоматизированных систем управления Военного учебного центра Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), zaycev290713@mail.ru

Смолев Иван Александрович – главный инспектор направления (комплектования) 2 управления Главного управления кадров Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 125284, г. Москва, 1-й Хорошевский пр-д, 3/1), 2upr-guk5@mil.ru

References

1. Losev Yu. I., ed. *Adaptive compensation of interference in communication channels.* Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988. 207 p. (In Russian).

2. Monzingo R. A., Miller Th. W. *Introduction to adaptive arrays.* New York, Wiley, 1980. 543 p.

3. Kalashnikov R. V. A technique for extracting elementary emitters from a circular phased array of the transparent-lens type for the formation of additional compensation antennas. *REDS: Telekommunikatsionnyye ustroystva i sistemy = REDS: Telecommunication Devices and Systems,* 2018, vol. 8, iss. 1, pp. 71–75. (In Russian). EDN: YTHBPF.

4. Burmistrov S. K., gen. ed. *Reference book of aerospace defense officer.* Tver, VA VKO Publ., 2006. 564 p. (In Russian).

5. Ratynskiy M. V. *Adaptation and super-resolution in antenna arrays.* Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2003. 197 p. (In Russian).

6. Hayes M. H. *Statistical digital signal processing and modeling.* Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 1996. 624 p.

7. Babushkin E. A., Kalashnikov R. V., Lavrent'yev A. M. Direction-finding technique for active jammers in multifunctional radar stations with a pass-through phased array antenna. *Radiolokatsiya: Teoriya i praktika.* Moscow, Yuniti-Dana Publ., 2023, pp. 73–87. (In Russian). EDN: NRGVZV.

8. Buyn G., Choo H. A novel approach to array manifold calibration using single-direction information for accurate direction-of-arrival estimation. *IEEE Trans. Antennas Propag.,* 2017, vol. 65, no. 9, pp. 4952–4957. https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2731374

9. Petrov S. V. Synthesis and analysis of algorithms for stochastic signal detection in the multielement antenna array systems. *Antenny = Antennas,* 2015, no. 7 (218), pp. 29–36. (In Russian). EDN: UIWAOP.

10. Lee H., Li F. Quantification of the difference between detection and resolution thresholds for multiple closely spaced emitters. *IEEE Trans. Signal Process.,* 1993, vol. 41, no. 36, pp. 2274–2277. https://doi.org/10.1109/78.218159

The article was submitted 20.03.2024; approved after reviewing 29.07.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Evgeniy A. Babushkin – Adjunct of the Staff Adjunct, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense (Russia, 150001, Yaroslavl, Moskovsky ave., 28), bebs37@mail.ru

Roman V. Kalashnikov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Radioengineering Systems Department, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense (Russia, 150001, Yaroslavl, Moskovsky ave., 28), karomm12@mail.ru

Alexander M. Lavrentyev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Radioengineering Systems Department, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense (Russia, 150001, Yaroslavl, Moskovsky ave., 28), alexalawrentew24@icloud.com

Sergey A. Zaitsev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Radar Stations and Automated Control Systems Department, Military Training Center, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), zaycev290713@mail.ru

Ivan A. Smolev – Chief Inspector of the Recruitment Department, Main Personnel Directorate of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 125284, Moscow, 1st Khoroshevsky dr., 3/1), 2upr-guk5@mil.ru

Научная статья
УДК 621.318.433
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-819-831
EDN: DJLEVK

Использование эффекта сильной связи для уменьшения размера принимающей катушки без понижения устойчивости системы индуктивной передачи энергии к имплантатам

Р. Р. Аубакиров, А. А. Данилов

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

rafael1994@mail.ru

Аннотация. Исследование способов уменьшения размеров имплантируемой части, в том числе размеров принимающей катушки системы индуктивной передачи энергии, является одним из актуальных направлений развития имплантируемых медицинских приборов. В то же время миниатюризация принимающей катушки индуктивности снижает устойчивость системы к смещениям, т. е. приводит к увеличению перепада мощности при изменении относительного положения принимающей и передающей катушек индуктивности. В связи с этим необходимо разрабатывать способы уменьшения размеров принимающей катушки индуктивности, позволяющие сохранить требуемую устойчивость к смещениям. В работе предложен способ уменьшения размеров принимающей катушки индуктивности, основанный на одновременном уменьшении размеров принимающей и увеличении размеров передающей катушек. В основу разработанного способа положен алгоритм проектирования катушек индуктивности, обеспечивающий достижение заданной устойчивости для заданного диапазона смещений. Результат работы алгоритма используется для минимизации размеров принимающей катушки, которая заключается в согласованном изменении размеров приемной и передающей катушек индуктивности до некоторой предельной точки, по достижении которой дальнейшее изменение размеров при сохранении заданных выходных характеристик оказывается невозможным. Разработанный способ верифицирован с помощью численного моделирования. По результатам расчетов установлено, что размеры (внешний радиус) принимающей катушки могут быть уменьшены на 30 %. Показано, что предельная точка достигается тогда, когда критическая связь между катушками возникает при заданном (номинальном) осевом расстоянии в отсутствие боковых смещений. Если

© Р. Р. Аубакиров, А. А. Данилов, 2024

при номинальном осевом расстоянии связь между катушками больше критической, то возможно уменьшение размеров принимающей катушки индуктивности.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, алгоритм оптимизации, катушечная пара, геометрическая оптимизация, имплантируемая медицинская техника

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.).

Для цитирования: Аубакиров Р. Р., Данилов А. А. Использование эффекта сильной связи для уменьшения размера принимающей катушки без понижения устойчивости системы индуктивной передачи энергии к имплантатам // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 819–831. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-819-831. – EDN: DJLEVK.

Original article

Using the strong coupling effect to reduce the size of the receiving coil without reducing the stability of the inductive energy transfer system to implants

R. R. Aubakirov, A. A. Danilov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

rafael1994@mail.ru

Abstract. The study of methods for downsizing the implanted part, including the receiving coil of inductive energy transfer system, is one of currently topical areas of implantable medical devices development. At the same time the miniaturization of the receiving inductance coil decreases the system resistance to displacements, i.e. leads to an increase in the power drop when the relative position of the receiving and transmitting inductance coils changes. Therefore it is necessary to develop methods for downsizing the receiving inductance coil that allow maintaining the required resistance to displacements. In this work, a method of receiving inductance coil downsizing is proposed, based on simultaneous size change, receiving coil downsize and transmitter coil upsize. An algorithm of inductance coil designing that provides for obtaining specified stability for a given range of displacements is taken as a principle of developed method. The algorithm output is used for receiving coil size minimizing that consists in a coordinated change of receiving and transmitting inductance coils size to a certain limiting point, upon reaching which further size change while maintaining the specified output characteristics is impossible. The developed method is verified by numerical modeling. According to calculation results it has been established that the size (outer radius) of receiving coil can be decreased by 30 %. It was demonstrated that the limiting point is reached when the critical coupling between the coils occurs at a given (nominal) axial distance in the absence of lateral displacements. If the coupling between the coils is higher than critical at the nominal axial distance, it is possible to downsize the receiving inductance coil.

Keywords: wireless power transmission, optimization algorithm, coil pair, geometric optimization, implantable medical devices

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement no. 075-15-2024-555 dated 04/25/2024).

For citation: Aubakirov R. R., Danilov A. A. Using the strong coupling effect to reduce the size of the receiving coil without reducing the stability of the inductive energy transfer system to implants. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 819–831. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-819-831. – EDN: DJLEVK.

Введение. Системы беспроводной передачи энергии, к которым относятся системы индуктивной передачи энергии, активно используются во многих отраслях, в том числе при создании имплантируемой медицинской техники [1, 2]. Одно из направлений развития этой области – разработка способов повышения устойчивости таких систем к смещениям катушек [3–6] с учетом специфических условий эксплуатации и технических требований к приборам [7, 8]. Для имплантируемой медицинской техники важным требованием является общая надежность и простота конструкции, в связи с чем в этой области особый интерес представляют способы геометрической оптимизации катушечной пары, поскольку они не приводят к усложнению системы [9, 10]. Недостаток такого способа заключается в неоправданном увеличении размера принимающей катушки. При этом для имплантируемой медицинской техники миниатюризация имплантируемой части [11–14] – одно из основных требований. Таким образом, возникает противоречие между необходимостью обеспечения устойчивости и минимизации размеров имплантата.

Цель настоящей работы – разработка способа уменьшения размеров принимающей катушки индуктивности при сохранении устойчивости к смещениям за счет увеличения размеров передающей катушки индуктивности, для которой требования по минимизации менее жесткие. В основу разработанного способа положен предложенный ранее алгоритм проектирования катушек индуктивности, обеспечивающий достижение заданной устойчивости для заданного диапазона смещений [15]. Устанавливаются закономерности, связывающие размеры приемной и передающей катушек индуктивности при сохранении заданной устойчивости, и определяются границы применимости способа, основанного на синхронном увеличении радиуса передающей и уменьшении радиуса принимающей катушек индуктивности.

Методика расчета. Для оценки применимости метода уменьшения размеров принимающей катушки без понижения устойчивости системы индуктивной передачи энергии к смещениям путем увеличения размера передающей катушки проведено моделирование систем индуктивной передачи энергии с круглыми катушками плоской формы, оптимизированных разработанным ранее алгоритмом [15].

Эквивалентная схема моделируемой системы индуктивной передачи энергии с последовательными компенсационными схемами в приемном и передающем контурах представлены на рис. 1. Выходную мощность системы P_L можно рассчитать по формуле

$$P_L = \frac{4\pi^2 f_0^2 M^2 V_S^2 R_L}{\left(Z_T Z_R + 4\pi^2 f_0^2 M^2\right)^2},$$

здесь f_0 – рабочая частота резонанса; M – взаимная индуктивность; V_S – напряжение питания; R_L – нагрузочное сопротивление; Z_T и Z_R – импедансы:

$$Z_T = 2j\pi f_0 L_T + \frac{1}{2j\pi f_0 C_T} + R_S,$$

$$Z_R = 2j\pi f_0 L_R + \frac{1}{2j\pi f_0 C_R} + R_L,$$

где R_S – сопротивление источника питания.

Взаимная индуктивность M равна:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oiint \frac{\overrightarrow{dl_t}\,\overrightarrow{dl_r}}{r_{tr}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; r_{tr} – расстояние между элементами витков катушек dl_t и $dl_{r,}$.

Перепад мощности в процентах рассчитывается следующим образом:

$$\Delta P_L = \left(\frac{P_{L\max}}{P_L} - 1\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{P_{L\min}}{P_L}\right) \cdot 100.$$

Параметры моделирования и оптимизации следующие:

Рабочая частота ..... 1 МГц
Внешний радиус принимающей катушки..... 30 мм
Сопротивление нагрузки ..... 20 Ом
Номинальная мощность..... 1 Вт
Допустимый перепад мощности..... 10 %
Номинальное осевое расстояние ..... 15 мм
Сопротивление передающей части ..... 5 Ом
Радиус сечения витка..... 0,4 мм

Начальное число витков подобрано таким образом, чтобы оптимальный размер передающей катушки получился наименьшим из возможных. Шаг между витками составляет не менее 1 мм. Собственные сопротивления передающей R_T и принимающей R_R катушек по причине сравнительно малых значений приняты равными нулю.

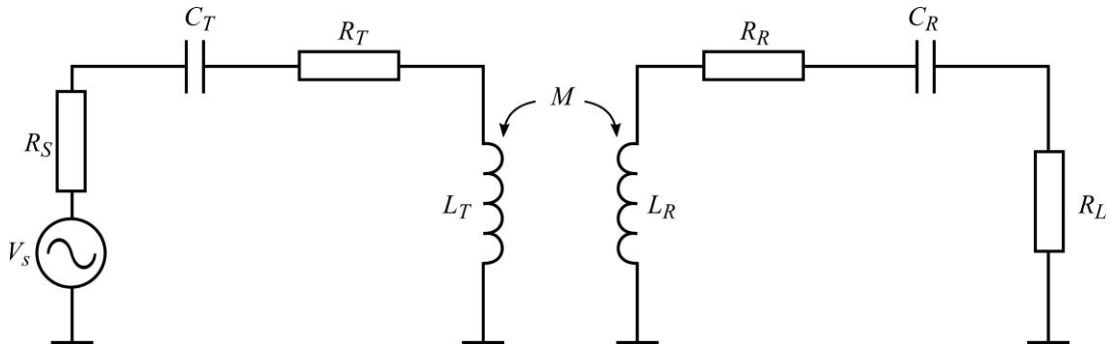


Рис. 1. Эквивалентная схема системы индуктивной передачи энергии с последовательными компенсациями в приемном и передающем контурах
Fig. 1. Equivalent circuit of an inductive energy transfer system with series compensations in the receiving and transmitting circuits

Расчет зависимости перепада мощности от размера передающей катушки. Для оценки предлагаемого способа уменьшения размера принимающей катушки за счет увеличения размера передающей катушки построен график зависимости перепада выходной мощности от внешнего радиуса передающей катушки для оптимизированной системы и систем с уменьшенным внешним радиусом принимающей катушки (рис. 2).

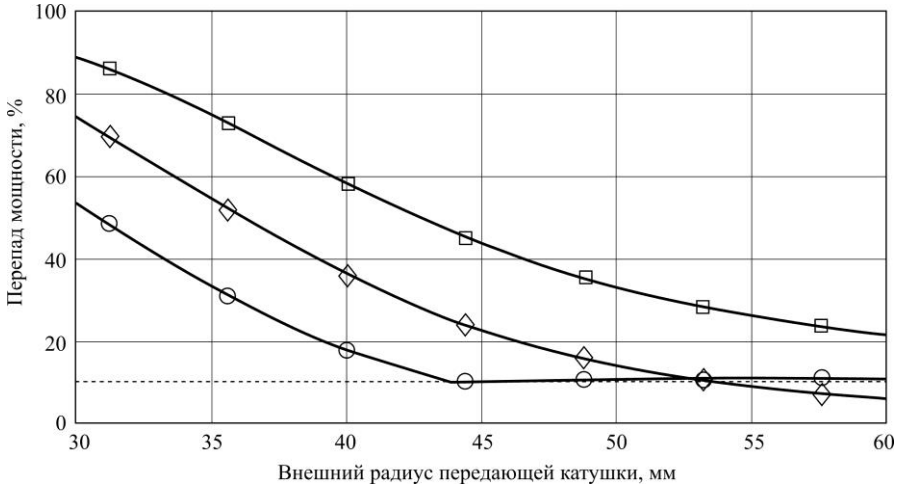


Рис. 2. Зависимость перепада выходной мощности от внешнего радиуса передающей катушки для оптимизированной системы с внешним радиусом принимающей катушки 30 мм (○) и систем с ее уменьшенным внешним радиусом: ◊ – 25 мм; □ – 20 мм; – – – перепад мощности 10 %

Fig. 2. Dependence of the output power drop on the outer radius of the transmitting coil for optimized system with an outer radius of the receiving coil of 30 mm (○) and for systems with its reduced outer radius: ◊ – 25 mm; □ – 20 mm; – – – power drop of 10 %

Принцип расчета следующий. В первую очередь проводится процедура оптимизации с начальными параметрами. Затем строится зависимость перепада выходной мощности от внешнего радиуса передающей катушки (с соответствующим пересчетом собственной индуктивности и емкостей для сохранения резонансной частоты) без изменения других параметров. Получившийся график позволяет оценить, как увеличение или уменьшение размера передающей катушки в оптимизированной системе может повлиять на перепад выходной мощности. Границы внешнего радиуса составляют от одного до двух радиусов принимающей катушки, т. е. от 30 до 60 мм. Как видно из рис. 2, принимающую катушку можно уменьшить без увеличения перепада мощности путем увеличения передающей катушки (при внешнем радиусе принимающей катушки 25 мм радиус передающей катушки нужно увеличить с 44 до 52,3 мм).

Оригинальная система имеет кривую с «переломом», т. е. точкой, после которой увеличение внешнего радиуса передающей катушки не позволяет уменьшить перепад мощности. Кривые для систем с уменьшенным внешним радиусом принимающей катушки r_{outR} не имеют данного «перелома». Однако не для всех случаев можно получить внешний радиус передающей катушки с тем же перепадом мощности (при внешнем радиусе принимающей катушки 20 мм радиус передающей катушки r_{outT} больше 60 мм). «Перелом» на графике также может быть частным случаем для данной оптимизированной системы. Поэтому, чтобы точнее оценить характер зависимости перепада мощности от внешнего радиуса передающей катушки, необходимо провести дополнительные расчеты.

Оценка влияния внешнего радиуса передающей катушки на перепад мощности при различных условиях геометрической оптимизации. Для оценки зависимости перепада выходной мощности от внешнего радиуса передающей катушки (с характерным «переломом» графика и его нахождением на требуемом значении перепада выходной мощности) проведены дополнительные процедуры оптимизации с изменением одного из основных начальных параметров. Проведены три расчета с изменением таких начальных параметров, как осевое расстояние, внешний радиус принимающей катушки, предельное боковое смещение.

Основные значения параметров системы с разным осевым расстоянием представлены в табл. 1. Зависимость перепада выходной мощности такой системы от внешнего радиуса передающей катушки представлена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, во всех случаях наблюдается точка «перелома» графика. При этом для осевого расстояния 5–15 мм эта точка совпадает с требуемым значением перепада мощности, равным 10 %, и внешним радиусом передающей катушки (см. табл. 1). Для осевого расстояния 20 мм пик оказался ниже 10 %.

Таблица 1

Значения параметров системы с разным осевым расстоянием

Table 1

Parameter values of the system with different axial distances

Параметр	Осевое расстояние, мм		
	5	10	15
Максимальное боковое смещение, мм	30	30	30
Внешний радиус передающей катушки, мм	48,5	45,81	43,98
Внутренний радиус передающей катушки, мм	6,52	11,33	6,36
Число витков в передающей катушке	11	11	15
Собственная индуктивность передающей катушки, мкГн	5,46	6,39	9,24
Внешний радиус принимающей катушки, мм	30	30	30
Внутренний радиус принимающей катушки, мм	6,52	11,33	6,36
Число витков в принимающей катушке	11	11	14
Собственная индуктивность принимающей катушки, мкГн	3,84	5,27	6,2
Емкость передающей платы, нФ	4,64	3,96	2,74
Емкость принимающей платы, нФ	6,6	4,81	4,11
Перепад выходной мощности	9,95	9,96	9,96
Начальное число витков	11	11	14

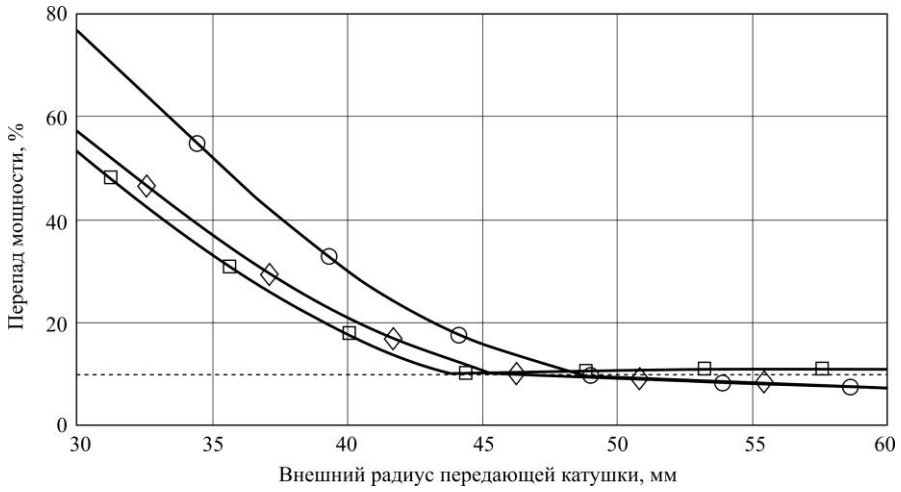


Рис. 3. Зависимость перепада выходной мощности от внешнего радиуса передающей катушки с разным осевым расстоянием: ○ – 5 мм; ◊ – 10 мм; □ – 15 мм; – – – перепад мощности 10 %

Fig. 3. Dependence of the output power drop on the outer radius of the transmitting coil with different axial distance: ○ – axial distance 5 mm; ◊ – 10 mm; □ – 15 mm; – – – power drop 10 %

Результаты оптимизации системы с разным внешним радиусом принимающей катушки представлены в табл. 2. Зависимость перепада выходной мощности данной системы от внешнего радиуса передающей катушки представлена на рис. 4.

Таблица 2

Значения параметров системы с разным внешним радиусом принимающей катушки

Table 2

Parameter values of the system with different external radii of the receiving coil

Параметр	Внешний радиус принимающей катушки, мм		
	25	30	35
Осевое расстояние, мм	15	15	15
Максимальное боковое смещение, мм	30	30	30
Внешний радиус передающей катушки, мм	50,12	43,98	38,04
Внутренний радиус передающей катушки, мм	1,56	6,36	18,56
Число витков в передающей катушке	22	15	10
Собственная индуктивность передающей катушки, мкГн	18,18	9,24	6,92
Внутренний радиус принимающей катушки, мм	1,56	6,36	18,56
Число витков в принимающей катушке	14	14	10
Собственная индуктивность принимающей катушки, мкГн	3,76	6,2	6,9
Емкость передающей платы, нФ	1,39	2,74	3,66
Емкость принимающей платы, нФ	6,74	4,11	3,67
Перепад выходной мощности	9,94	9,96	9,93
Начальное число витков	14	14	10

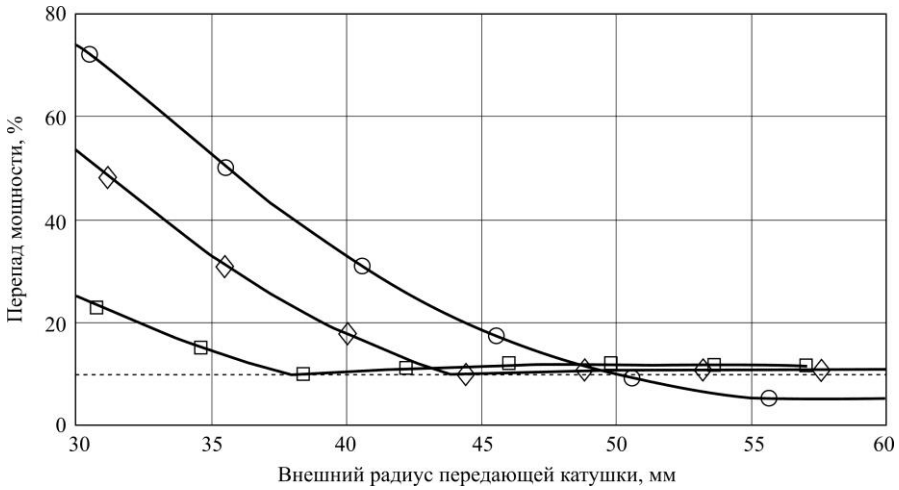


Рис. 4. Зависимость перепада выходной мощности от внешнего радиуса передающей катушки с разным внешним радиусом принимающей катушки: ○ – 25 мм; ◊ –30 мм; □ –35 мм; – – – перепад мощности 10 %

Fig. 4. Dependence of the output power drop on the outer radius of the transmitting coil with different outer radius: ○ – 25 mm; ◊ – 30 mm; □ – 35 mm; – – – power drop 10 %

Результаты, представленные на рис. 4, аналогичны результатам, показанным на рис. 3: точки «перелома» кривых для систем с внешними радиусами принимающей катушки 30 и 35 мм расположены на перепаде мощности 10 %, внешний радиус передающей катушки для данных точек соответствует результатам оптимизации. При внешнем радиусе принимающей катушки 25 мм «перелом» находится ниже 10 %. При меньшем внешнем радиусе принимающей катушки начальное число витков, при котором будет достигаться оптимальная геометрия, возрастает с учетом того, что для рассматриваемого случая максимальное число витков, которое может поместиться в принимающей катушке, составляет (25 мм – 1 мм) / (1 мм + 0,8 мм) = 13,3, т. е. ~ 13–14 витков, установить наилучшее значение начального числа витков может не получиться.

Результаты оптимизации системы с разным боковым смещением представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 3

Значения параметров системы с разным боковым смещением

Table 3

Parameter values of the system with different lateral displacement

Параметр	Максимальное боковое смещение, мм		
	25	30	35
Осевое расстояние, мм	15	15	15
Внешний радиус передающей катушки, мм	34,26	43,98	54,3
Внутренний радиус передающей катушки, мм	1,15	6,36	5,86
Число витков в передающей катушке	18	15	15
Собственная индуктивность передающей катушки, мкГн	8,2	9,24	10,72
Внешний радиус принимающей катушки, мм	30	30	30
Внутренний радиус принимающей катушки, мм	1,15	6,36	5,86
Число витков в принимающей катушке	17	14	14
Собственная индуктивность принимающей катушки, мкГн	6,42	6,2	5,96
Емкость передающей платы, нФ	3,09	2,74	2,36
Емкость принимающей платы, нФ	3,95	4,11	4,25
Перепад выходной мощности	9,92	9,96	9,95
Начальное число витков	17	14	14

При предельном боковом смещении 25 мм «перелом» оказался ниже 10 % по той же причине, что и для предыдущих расчетов, т. е. максимально допустимое начальное значение для данного случая 17 витков (теоретически оптимальное значение может быть больше). В остальных случаях имеются «переломы» на 10 % перепада мощности и оптимальное значение внешнего радиуса передающей катушки соответствует данной точке.

Согласно расчетам «перелом» кривой зависимости перепада мощности от внешнего радиуса присутствует во всех случаях. Если система имеет оптимальные параметры (с учетом ограничений получена оптимальная комбинация параметров внутренних, внешних радиусов и числа витков), то «перелом» находится на значении перепада мощности 10 % и дальнейшее увеличение внешнего радиуса передающей катушки не приведет к уменьшению перепада мощности.

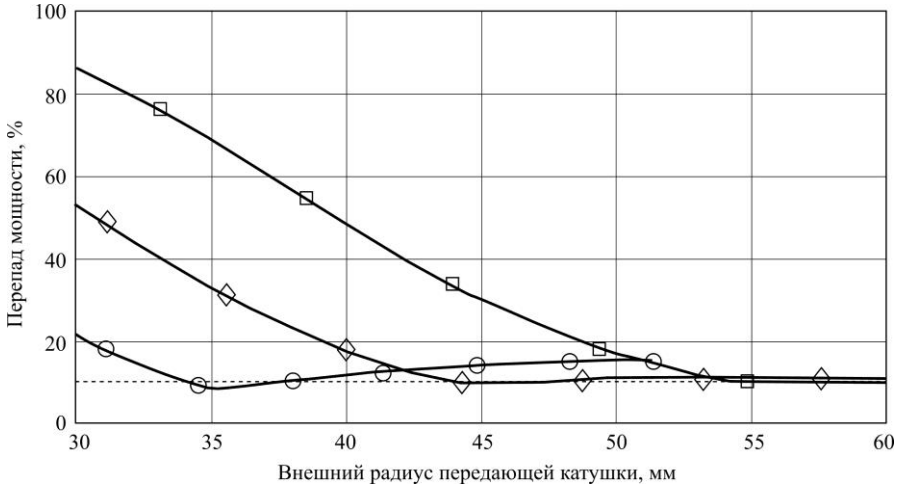


Рис. 5. Зависимость перепада выходной мощности от внешнего радиуса передающей катушки с разным боковым смещением: ○ – до 25 мм; ◊ – до 30 мм; □ – до 35 мм; – – – перепад мощности 10 %

Fig. 5. Dependence of the output power drop on the outer radius of the transmitting coil with different lateral offset: ○ – up to 25 mm; ◊ – up to 30 mm; □ – up to 35 mm; – – – power drop 10 %

Результаты и их обсуждение. Как было отмечено ранее, уменьшить внешний радиус принимающей катушки без изменения перепада мощности можно, увеличив внешний радиус передающей катушки. Однако у такого метода есть ограничения, для установления которых построены графики зависимости внешнего радиуса передающей катушки от внешнего радиуса принимающей катушки систем с перепадом выходной мощности 10 % для осевых расстояний 5, 10 и 15 мм по параметрам из табл. 1 (рис. 6). Начальные параметры оптимизации соответствуют расчету для системы с разным осевым расстоянием.

При осевом расстоянии 16,7 % от внешнего радиуса принимающей катушки ее внешний радиус можно уменьшить максимум на 16 %, увеличив внешний радиус передающей катушки на 52 %, при 33,3 % – на 23 %, увеличив внешний радиус передающей катушки на 71 %, при 50 % – на 29 %, увеличив внешний радиус передающей катушки на 100 %.

При осевом расстоянии 15 мм рекомендуется уменьшать внешний радиус принимающей катушки не более чем на 20 %, при 10 мм – на 17 %, при 5 мм – на 11 %, поскольку большее уменьшение требует значительного увеличения ее внешнего радиуса (рост внешнего радиуса передающей катушки на последующих шагах превышает 20 %). Таким образом, чем больше осевое расстояние между катушками, тем больше возможность уменьшить размер принимающей катушки оптимизированной системы.

Ограничение в уменьшении внешнего радиуса принимающей катушки можно объяснить следующим образом. На рис. 7 представлена зависимость выходной мощности от бокового смещения для системы с осевым расстоянием 15 мм при $r_{outR} = r_{outR\,max} = 30$ мм и $r_{outR} = r_{outR\,min} = 22{,}5$ мм (где r_{outR} – внешний радиус принимающей катушки; $r_{outR\,max}$, $r_{outR\,min}$ – максимальный и минимальный внешний радиусы принимающей катушки соответственно). Расчет для предельно возможного уменьшения внешнего радиуса принимающей катушки проведен с шагом 5 %, поэтому поиск середины или предельного значения внешнего радиуса принимающей катушки может быть неточным, но достаточным для понимания принципа поиска.

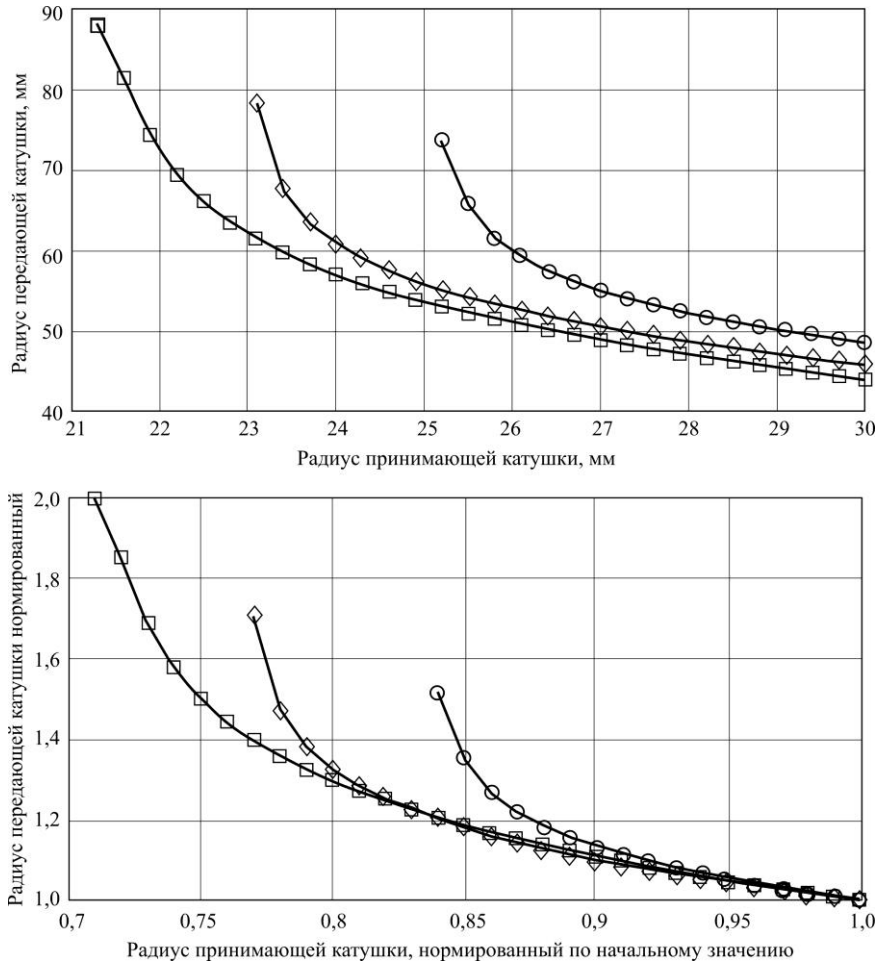


Рис. 6. Зависимости внешнего радиуса передающей катушки от внешнего радиуса принимающей катушки систем с перепадом выходной мощности 10 % для осевых расстояний 5 мм (○), 10 мм (◊) и 15 мм (□)

Fig. 6. Dependences of the outer radius of the transmitting coil on the outer radius of the receiving coil of systems with an output power drop of 10 % for axial distances of 5 mm (○), 10 mm (◊) and 15 mm (□)

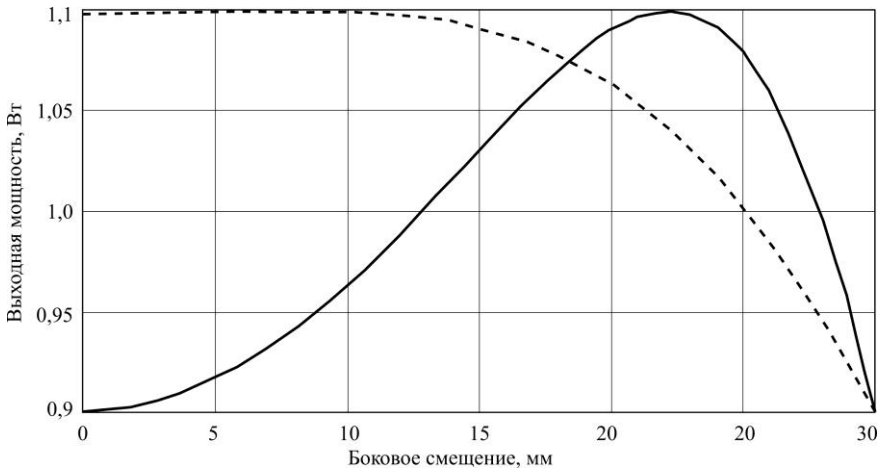


Рис. 7. Зависимость выходной мощности от бокового смещения при $r_{outR} = r_{outR\max} = 30$ мм (——) и $r_{outR} = r_{outR\ \min} = 22{,}5$ мм (– – –) с осевым расстоянием 15 мм

Fig. 7. Dependence of the output power on lateral displacement for the case with $r_{outR} = r_{outR\max} = 30$ mm (——) and $r_{outR} = r_{outR\ \min} = 22.5$ mm (– – –) and an axial distance of 15 mm

С уменьшением радиуса принимающей катушки и соответственным увеличением радиуса передающей катушки точка критической связи приближается к значению бокового смещения, равному 0. Предельным случаем, после которого уменьшение радиуса принимающей катушки невозможно компенсировать увеличением радиуса передающей катушки, является случай, когда катушки без смещений работают на точке критической связи.

Заключение. На основе численного моделирования показано, что увеличение радиуса передающей катушки позволяет значительно уменьшить перепад мощности до определенного значения, после чего перепад мощности не меняется или увеличивается. В случаях, когда передающие катушки находятся на малом осевом расстоянии друг от друга (менее 1/3 от внешнего радиуса принимающей катушки), после достижения определенного значения перепад мощности продолжает падать, но с заметно меньшей скоростью, что делает дальнейшее увеличение ее размеров непродуктивным.

Использовать данный метод компенсации меньшего размера принимающей катушки за счет размеров передающей рекомендуется в том случае, когда появляется необходимость в уменьшении перепада мощности (при похудении пациента, т. е. уменьшении осевого расстояния, при прямом питании по истечении срока работы имплантируемого аккумулятора или при увеличении предельного значения бокового смещения) в случае отсутствия возможности поменять принимающую катушку, например, когда она имплантирована в организм человека.

Литература

1. ***Khan S. R., Pavuluri S. K., Cummins G., Desmulliez M. P. Y.*** Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review // Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 12. Art. No. 3487. https://doi.org/10.3390/s20123487

2. ***Haerinia M., Shadid R.*** Wireless power transfer approaches for medical implants: A review // Signals. 2020. Vol. 1. Iss. 2. P. 209–229. https://doi.org/10.3390/signals1020012

3. ***Lee T.-S., Huang S.-J., Dai S.-H., Su J.-L.*** Design of misalignment-insensitive inductive power transfer via interoperable coil module and dynamic power control // IEEE Trans. Power Electron. 2020. Vol. 35. No. 9. P. 9024–9033. https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2972035

4. Operation of inductive charging systems under misalignment conditions: A review for electric vehicles / ***V.-B. Vu, A. Ramezani, A. Triviño et al.*** // IEEE Trans. Transp. Electrif. 2022. Vol. 9. No. 1. P. 1857–1887. https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3165465

5. ***Cortes I., Kim W.-J.*** Lateral position error reduction using misalignment-sensing coils in inductive power transfer systems // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2018. Vol. 23. No. 2. P. 875–882. https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2801250

6. An LCC-SP compensated inductive power transfer system and design considerations for enhancing misalignment tolerance / ***J. Yang, X. Zhang, K. Zhang et al.*** // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 193285–193296. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032793

7. ***Karimi M. J., Schmid A., Dehollain C.*** Wireless power and data transmission for implanted devices via inductive links: A systematic review // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. No. 6. P. 7145–7161. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049918

8. ***Covic G. A., Boys J. T.*** Inductive power transfer // Proc. IEEE. 2013. Vol. 101. No. 6. P. 1276–1289. https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2244536

9. Safety-optimized inductive powering of implantable medical devices: Tutorial and comprehensive design guide / ***N. Soltani, M. ElAnsary, J. Xu et al.*** // IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. 2021. Vol. 15. No. 6. P. 1354–1367. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2021.3125618

10. ***Schormans M., Valente V., Demosthenous A.*** Practical inductive link design for biomedical wireless power transfer: A tutorial // IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. 2018. Vol. 12. No. 5. P. 1112–1130. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2018.2846020

11. ***Singer A., Robinson J. T.*** Wireless power delivery techniques for miniature implantable bioelectronics // Adv. Healthcare Mater. 2021. Vol. 10. Iss. 17. Art. ID: 2100664. https://doi.org/10.1002/adhm.202100664

12. The microbead: A highly miniaturized wirelessly powered implantable neural stimulating system / ***A. Khalifa, Y. Karimi, Q. Wang et al.*** // IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 521–531. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2018.2802443

13. ***Freeman D. K., Byrnes S. J.*** Optimal frequency for wireless power transmission into the body: Efficiency versus received power // IEEE Trans. Antennas Propag. 2019. Vol. 67. No. 6. P. 4073–4083. https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2905672

14. A modified wireless power transfer system for medical implants / ***Y. Ben Fadhel, S. Ktata, Kh. Sedraoui et al.*** // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 10. Art. No. 1890. https://doi.org/10.3390/en12101890

15. An algorithm for the computer aided design of coil couple for a misalignment tolerant biomedical inductive powering unit / ***A. A. Danilov, R. R. Aubakirov, E. A. Mindubaev et al.*** // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 70755–70769. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919259

Статья поступила в редакцию 09.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 19.09.2024 г.; принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Аубакиров Рафаэль Рафаэльевич – ассистент Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), rafael1994@mail.ru

Данилов Арсений Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), arseny.danilov@gmail.com

References

1. Khan S. R., Pavuluri S. K., Cummins G., Desmulliez M. P. Y. Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 12, art. no. 3487. https://doi.org/10.3390/s20123487

2. Haerinia M., Shadid R. Wireless power transfer approaches for medical implants: A review. *Signals*, 2020, vol. 1, iss. 2, pp. 209–229. https://doi.org/10.3390/signals1020012

3. Lee T. S., Huang S.-J., Dai S.-H., Su J.-L. Design of misalignment-insensitive inductive power transfer via interoperable coil module and dynamic power control. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2020, vol. 35, no. 9, pp. 9024–9033. https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2972035

4. Vu V.-B., Ramezani A., Triviño A., González-González J. M., Kadandani N. B., Dahidah M., Pickert V. et al. Operation of inductive charging systems under misalignment conditions: A review for electric vehicles. *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 1857–1887. https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3165465

5. Cortes I., Kim W.-J. Lateral position error reduction using misalignment-sensing coils in inductive power transfer systems. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 875–882. https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2801250

6. Yang J., Zhang X., Zhang K., Cui X., Jiao C., Yang X. An LCC-SP compensated inductive power transfer system and design considerations for enhancing misalignment tolerance. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 193285–193296. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032793

7. Karimi M. J., Schmid A., Dehollain C. Wireless power and data transmission for implanted devices via inductive links: A systematic review. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 7145–7161. https://10.1109/JSEN.2021.3049918

8. Covic G. A., Boys J. T. Inductive power transfer. *Proc. IEEE*, 2013, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289. https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2244536

9. Soltani N., ElAnsary M., Xu J., Filho J. S., Genov R. Safety-optimized inductive powering of implantable medical devices: Tutorial and comprehensive design guide. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 1354–1367. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2021.3125618

10. Schormans M., Valente V., Demosthenous A. Practical inductive link design for biomedical wireless power transfer: A tutorial. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 1112–1130. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2018.2846020

11. Singer A., Robinson J. T. Wireless power delivery techniques for miniature implantable bioelectronics. *Adv. Healthcare Mater.*, 2021, vol. 10, iss. 17, art. ID: 2100664. https://doi.org/10.1002/adhm.202100664

12. Khalifa A., Karimi Y., Wang Q., Montlouis W., Garikapati S., Stanaćević M., Takor N., Etienne-Cummings R. The microbead: A highly miniaturized wirelessly powered implantable neural stimulating system. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 521–531. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2018.2802443

13. Freeman D. K., Byrnes S. J. Optimal frequency for wireless power transmission into the body: Efficiency versus received power. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, vol. 67, no. 6, pp. 4073–4083. https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2905672

14. Ben Fadhel Y., Ktata S., Sedraoui K., Rahmani S., Al-Haddad K. A modified wireless power transfer system for medical implants. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 10, art. no. 1890. https://doi.org/10.3390/en12101890

15. Danilov A. A., Aubakirov R. R., Mindubaev E. A., Gurov K. O., Telyshev D. V., Selishchev S. V. An algorithm for the computer aided design of coil couple for a misalignment tolerant biomedical inductive powering unit. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 70755–70769. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919259

The article was submitted 09.09.2024; approved after reviewing 19.09.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Rafael R. Aubakirov – Assistant of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), rafael1994@mail.ru

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

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

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.412:519.688
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-6-832-844
EDN: EKGRMR

Параллельная реализация алгоритма повышения контрастности изображения на основе нечетких множеств

***Ю. И. Новиков*[1], *С. А. Лупин*[1], *Ю. В. Савченко*[1], *Д. А. Звонарев*[2]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*«ИП Звонарев Владимир Александрович», г. Тула, Россия*

jury.novikov@mail.ru

Аннотация. От качества решения проблемы яркостной предобработки изображений в задачах компьютерного зрения зависят выходные результаты многих алгоритмов. Одна из сложностей яркостной предобработки изображений – повышение контрастности. Наиболее популярным подходом к решению данной проблемы является применение гистограммных методов – эквализации. Существуют также перспективные алгоритмы, основанные на использовании нечетких множеств, которые не получили такого же распространения, как гистограммные методы, в силу высокой вычислительной сложности. Однако благодаря свойству линейности такие алгоритмы могут быть эффективно распараллелены. В работе рассмотрена параллельная реализация алгоритма повышения контрастности изображения на основе нечетких множеств. Представлена экспериментальная оценка эффективности распараллеливания процесса определения значений выходной яркости в алгоритме повышения контрастности на основе нечетких множеств. Определена зависимость коэффициента ускорения вычислений от объема входных данных (размера изображения) для параллельной реализации алгоритма и проведена оценка его асимптотической сложности (нотация «О» большое). Получена количественная характеристика эффективности восстановления контрастности предложенным методом по сравнению с равномерной линеаризацией, при этом в качестве измеряемого параметра использован индекс структурного сходства восстановленных изображений по отношению к исходным.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, методы яркостных преобразований, нечеткие множества, технология CUDA, параллельные вычисления

© Ю. И. Новиков, С. А. Лупин, Ю. В. Савченко, Д. А. Звонарев, 2024

Для цитирования: Новиков Ю. И., Лупин С. А., Савченко Ю. В., Звонарев Д. А., Параллельная реализация алгоритма повышения контрастности изображения на основе нечетких множеств // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 6. С. 832–844. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-832-844. – EDN: EKGRMR.

Original article

Parallel implementation of the image contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets

Yu. I. Novikov[1], S. A. Lupin[1], Yu. V. Savchenko[1], D. A. Zvonarev[2]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]"IP Zvonarev Vladimir Alexandrovich", Russia

jury.novikov@mail.ru

Abstract. The output results of many algorithms in computer vision tasks depend on image brightness preprocessing problem solution quality. One of challenges in image brightness preprocessing is a contrast enhancement issue. The most popular approach to solving this problem is the use of histogram methods – equalization. There also are promising algorithms based on the use of fuzzy sets, which have not become as widespread as histogram methods by force of their high computational complexity. However, due to the linearity property such algorithms can be effectively parallelized. In this work, parallel implementation of an algorithm for image contrast enhancement based on fuzzy sets is considered. An experimental estimate of efficiency of parallelizing the output brightness values determination process in image contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets is presented. The dependence of the calculation acceleration factor on the volume of input data (image size) for parallel implementation of the algorithm has been determined and its asymptotic complexity was estimated (Big O notation). The quantitative characteristic of contrast restoration effectiveness by the proposed method in comparison with uniform linearization is obtained, while the index of structural similarity of the restored images in relation to the original ones is used as measured parameter.

Keywords: digital image processing, brightness transformation methods, fuzzy sets, CUDA toolkit, parallel computing

For citation: Novikov Yu. I., Lupin S. A., Savchenko Yu. V., Zvonarev D. A. Parallel implementation of the image contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 6, pp. 832–844. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-832-844. – EDN: EKGRMR.

Введение. Во многих задачах компьютерного зрения существует проблема предварительной обработки изображений, которая является критической, поскольку качество ее решения определяют результаты работы алгоритмов постобработки, например таких, как выделение признаков. Для корректного выделения признаков объектов, используемых в задачах цифровой обработки изображений и распознавания образов, необходимо, чтобы все изображения выборки были идентичны в цветовом представлении и не были зашумлены. Борьба с шумами – задача преимущественно обработки изображе-

ний. В силу своей многолетней истории и развития математического аппарата она получила достаточно большое число подходов к решению. С развитием высокопроизводительных вычислительных систем стало возможным пересмотреть существующие подходы к яркостным преобразованиям изображений и начать применять те алгоритмы, которые ранее не использовались на практике из-за их вычислительной сложности. Применение в качестве вычислительной платформы графических ускорителей и технологии параллелизации CUDA дает возможность использовать алгоритм яркостной предобработки на основе нечетких множеств на практике.

В настоящей работе рассматривается параллельная реализация алгоритма повышения контрастности изображения на основе нечетких множеств.

Изменение гистограммы как основной подход к яркостным преобразованиям изображения. Любое изображение с математической точки зрения представляется двумерной функцией $f(x, y)$, где x и y – координаты в пространстве (на плоскости), значение f – яркость (в случае монохромного изображения – уровень серого). Если величины x, y и f принимают конечное число дискретных значений, то такое изображение называется цифровым, т. е. изображением, дискретизированным в пространстве на конечное число точек, именуемых пикселями, и квантованным по конечному числу уровней яркости [1].

При градационных преобразованиях для вычисления интенсивности точки результирующего изображения используется только интенсивность соответствующей точки исходного изображения. Статистический подход основывается на анализе и заданном воздействии на гистограмму, которая есть статистическая характеристика изображения и которая содержит количественную информацию о распределении элементов цифрового изображения по яркости. Очевидно, что преобразования яркости, производимые над цифровыми изображениями, приводят к изменениям их гистограмм.

Гистограмма монохромного цифрового изображения с уровнями яркости в дискретном диапазоне $\{0, \ldots, L-1\}$ представляет собой дискретную функцию

$$h(r_k) = n_k, 0 \le k \le L-1,$$

где r_k – k-й уровень яркости; n_k – число пикселей яркости r_k; L – число уровней яркости.

Форма гистограммы позволяет оценить уровень контрастности изображения. Если гистограмма сконцентрирована на малом участке уровней яркости, то такое изображение имеет низкую контрастность. Обратное утверждение свидетельствует о высокой контрастности изображения. Смещение центра тяжести гистограммы влево характеризует затемненное изображение, вправо – осветленное.

Одним из наиболее распространенных подходов к яркостной предобработке является эквализация гистограммы (в базовом случае ее еще называют линеаризацией гистограммы) – яркостное преобразование вида [1]

$$s_k = T(r_k) = (L-1)\sum_{j=0}^{k} p_r(r_j), \quad (1)$$

где $p_r(r_j)$ – частота появления пикселя с яркостью r_j на изображении размером $M \times N$ пикселей. Она рассчитывается как

$$p_r(r_j) = \frac{n_j}{M \cdot N}.$$

Тогда выражение (1) можно представить следующим образом:

$$s_k = T(r_k) = (L-1)\sum_{j=0}^{k} p_r(r_j) = \frac{L-1}{M \cdot N}\sum_{j=0}^{k} n_j .$$

Результатом эквализации будет изображение, гистограмма которого приближена по форме к равномерному распределению. При этом значения яркости эквализованного изображения перекрывают более широкий диапазон яркостей, чем у изначального [2]. Эквализация в ее изначальном варианте (равномерная линеаризация) требует двукратного обращения к памяти для получения текущей яркости пикселя и вероятностей пикселей, яркость которых не превышает яркости обрабатываемого пикселя. Таким образом, в зависимости от общей светлости фона изображения эквализация может иметь наихудший, средний и наилучший случаи сложности. Во всех случаях асимптотическая сложность (нотация «О» большое) оценивается как линейная при последовательной реализации алгоритма [3].

В работе [4] рассмотрены различные яркостные преобразования: логарифмическое, гамма-коррекция, кусочно-линейное, а также яркостное на основе нечетких множеств [1]. Эксперименты показали, что наиболее качественным преобразованием, усиливающим контраст, является последнее. Однако в работе [1] отмечается, что цена такого улучшения результатов – значительное усложнение вычислений, и дана рекомендация, что в случае необходимости обеспечения потоковой обработки кадров из последовательности изображений следует применять данный алгоритм, основанный на нечетких множествах, только для получения эталонной контрастности последовательности, а остальные кадры следует обрабатывать вычислительно менее затратной эквализацией по «приведенной» гистограмме, приводящей гистограмму обрабатываемого изображения к заданному виду. Однако у такого подхода есть существенное ограничение, а именно: все кадры обрабатываемой последовательности должны иметь идентичные гистограммы, а последовательность не должна содержать сильно отличающиеся сцены изображений, что практически не реализуется в большинстве случаев видеосъемки. Нарушение этого требования будет приводить к яркостным искажениям.

Алгоритм повышения контрастности изображения на основе нечетких множеств. Алгоритм повышения контрастности на основе нечетких множеств [1] более сложен в вычислительном плане. Для того чтобы корректно оценить сложность алгоритма и возможность его параллельной реализации, рассмотрим этапы и операции, которые он включает в себя.

Алгоритм яркостного преобразования на основе нечетких множеств представляет собой специальную модификацию кусочно-линейных преобразований, производимую над тремя «классами» пикселей. На рис. 1 показана диаграмма потоков данных (DFD-диаграмма) рассматриваемого алгоритма в нотации Гейна – Сарсона. Рассмотрим основные этапы данного алгоритма. Диаграмма на рис. 1 – это описание потоков данных в рамках алгоритма. Блоки с пометками П1–П6 являются процедурами алгоритма.

Согласно общему подходу к работе с алгоритмами, основанными на нечетких множествах, первый шаг – определение особых правил, задаваемых лингвистически. Для алгоритма яркостного преобразования правила нечеткой логики формулируются следующим образом [1]: 1) если пиксель темный, то сделать его темнее; 2) если пиксель серый, то оставить его серым; 3) если пиксель светлый, то сделать его светлее. Таким образом, пиксели изображения должны быть предварительно поделены на три класса: темный, серый и светлый. Это разделение задается математически с помощью функций принадлежности, связывающих входные параметры со степенью принадлежности этих параметров к нечетким множествам.

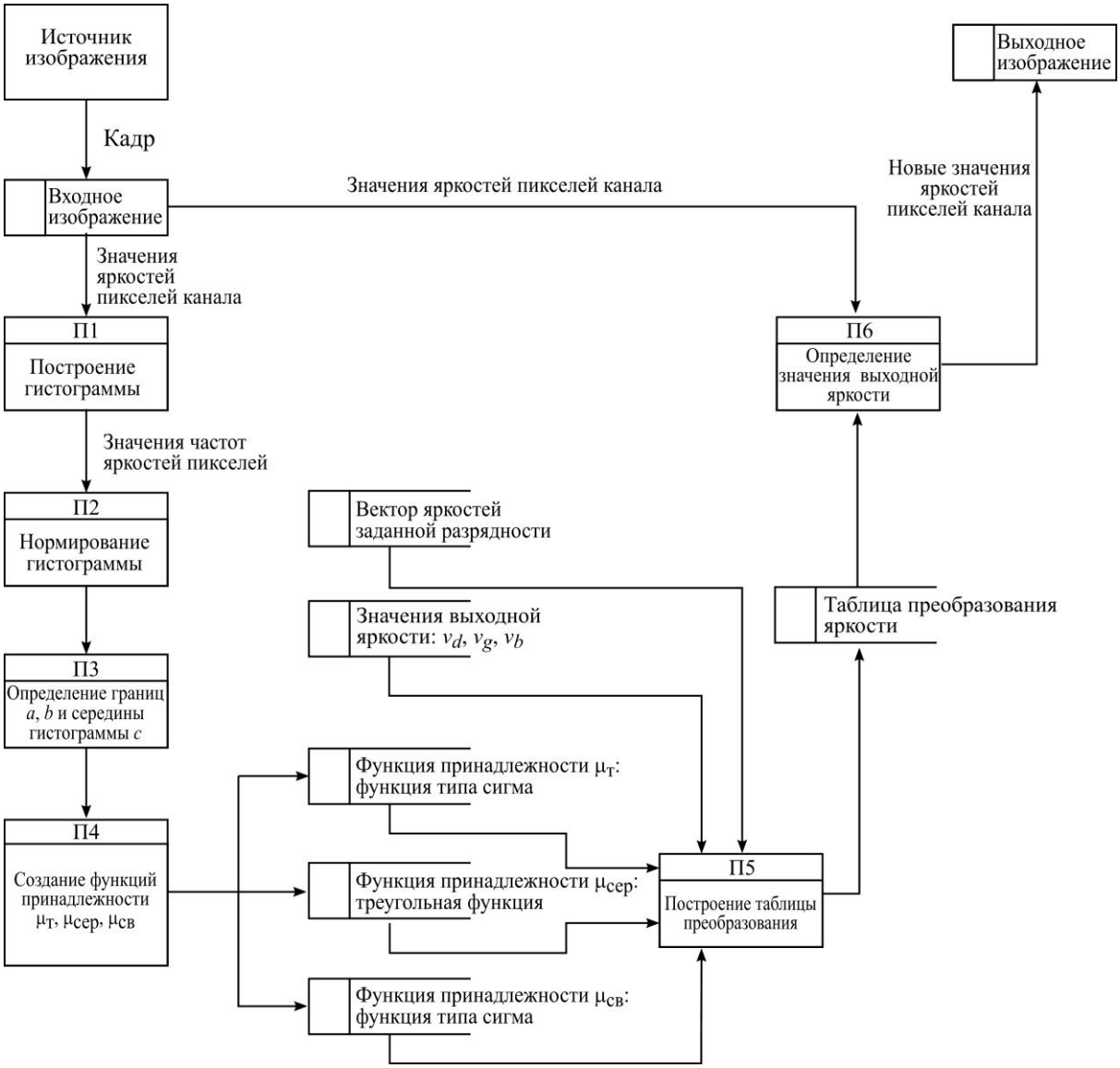


Рис. 1. Диаграмма потоков данных алгоритма повышения контрастности на основе нечетких множеств
Fig. 1. Data flow diagram of a contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets

После этапа перехода в нечеткую область (или этапа фаззификации) осуществляется выполнение правил согласно другой функции принадлежности, связывающей результирующие степени принадлежности с выходными параметрами. Для рассматриваемого алгоритма выходные функции принадлежности определяются набором из трех значений яркости, соответствующих классам пикселей, имеющих минимальный, средний и максимальный уровни яркости пикселя. Этап фаззификации заключается в определении степеней принадлежности яркости пикселя к каждому из классов (темный, серый и светлый) посредством соответствующих функций принадлежности: $\mu_т(z_0)$, $\mu_{сер}(z_0)$, $\mu_{св}(z_0)$, где z_0 – входная яркость пикселя. Согласно [1] функции принадлежности $\mu_т$ и $\mu_{св}$ имеют формы типа сигма, а $\mu_{сер}$ задана треугольной функцией. Сигма-функции $\mu_т$ и $\mu_{св}$ зеркально отражены относительно друг друга через точку перегиба треугольной функции. Требуется построить совокупную входную функцию принадлежности таким образом, чтобы алгоритм повышения контрастности, во-первых, покрывал наибольшее количество яркостей изображения, а во-вторых, чтобы сумма значений всех трех со-

ставляющих функций принадлежности (треугольная функция и две сигма-функции) была равна единице в каждой точке яркости. Для автоматизации выполнения условий построения функций принадлежности (см. рис. 1, процедуры П1–П4) необходимо найти серединное положение компонентов *c* гистограммы изображения, превышающих некоторое пороговое значение (например, 1 % от максимума гистограммы), и определить «размах» гистограммы, т. е. ее границы *a* и *b*, при условии, что входное изображение является низкоконтрастным.

Параметры описанных функций определяются в ходе анализа каждого изображения отдельно, а в случае видеопотока – в ходе анализа каждого кадра видеопоследовательности. Пример наложения входных функций принадлежности, составленных по описанным параметрам, поверх гистограммы низкоконтрастного изображения представлен на рис. 2.

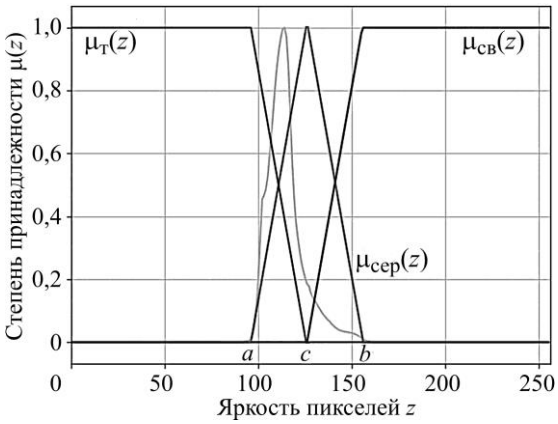


Рис. 2. Входные функции принадлежности, наложенные на гистограмму низкоконтрастного изображения

Fig. 2. Input membership functions superimposed on the histogram of a low-contrast image

Следующий этап дефаззификации представляет собой переход из области нечетких множеств в область выходных значений. Традиционно в качестве метода дефаззификации используется центроидный метод [5], суть которого заключается в вычислении четкого значения выходной переменной как центра тяжести совокупного нечеткого множества. В рассматриваемом алгоритме для каждого пикселя необходимо вычислить новое значение путем расчета центра тяжести нечетких множеств для каждого правила. Если переменная выходной принадлежности v может принимать K значений, выражение для центра тяжести совокупного нечеткого множества $Q(v)$, составленного из правил 1–3, в общем случае будет иметь вид

$$v_0 = \frac{\sum_{v=1}^{K} v \cdot Q(v)}{\sum_{v=1}^{K} Q(v)}. \qquad (2)$$

Выходная функция принадлежности задается опорными значениями, характеризующими яркость определенного класса пикселей. Для 8-битного представления яркости значения выходной принадлежности v задаются следующим образом [1]: для правила 1: $v_d = 0$; для правила 2: $v_g = 0$; для правила 3: $v_b = 0$. Тогда, подставив необходимые значения в (2), получим, что выходная яркость пикселя может быть вычислена так [1]:

$$v_0 = \frac{\mu_{\text{т}}(z_0) \cdot v_d + \mu_{\text{сер}}(z_0) \cdot v_g + \mu_{\text{св}}(z_0) \cdot v_b}{\mu_{\text{т}}(z_0) + \mu_{\text{сер}}(z_0) + \mu_{\text{св}}(z_0)}. \qquad (3)$$

Использование указанных входных функций принадлежности с заданными параметрами также обеспечивает равенство единице суммы входных функцией принадлежности, благодаря чему в любой точке z_0 знаменатель (3) равен единице, что упрощает вычисления.

Представленный алгоритм сопряжен с многократно повторяемой длительной операцией обращения в память для получения яркости текущего обрабатываемого пикселя и выходного значения из таблицы преобразований. Таблица преобразований (см. рис. 1, процедура П5) строится для всех возможных значений яркостей заданной разрядности (для 8-битного изображения – 256 градаций). Для составления таблицы требуется наличие константных опорных значений яркостей классов, а также трех входных функций принадлежности.

Анализ диаграммы на рис. 1 позволяет сделать вывод, что наибольшее число источников данных требуется для процесса построения таблицы преобразований с помощью выражения (3), который ограничен по числу операций и не зависит от размера изображения, а значит, может быть выполнен в последовательной части алгоритма. Сложностью алгоритма, зависящего от объема данных (т. е. от размера входного изображения), является процесс определения значений выходной переменной – процедура П6 (см. рис. 1). Эта процедура требует множественных обращений к памяти: при вычислении яркости каждого пикселя изображения, чтения табличного значения для преобразования в новое значение яркости, а также для записи новых значений яркостей пикселей выходного изображения.

Таким образом, для повышения практической применимости рассматриваемого алгоритма целесообразно прежде всего распараллелить процесс определения значений выходной яркости.

Вычислительные эксперименты. Для экспериментальной оценки эффективности распараллеливания процесса определения значений выходной яркости в алгоритме повышения контрастности на основе нечетких множеств создано параллельное приложение, которое реализуется на графическом процессоре и использует технологию CUDA. Проводимые исследования направлены:

– на установление зависимости коэффициента ускорения вычислений параллельной реализации от объема входных данных (размера изображения);

– оценку асимптотической сложности алгоритма;

– определение количественной характеристики эффективности восстановления контрастности по сравнению с равномерной линеаризацией.

Основные этапы экспериментов:

1. Подготовка оригиналов низкоконтрастных изображений разного размера.

2. Разработка последовательного и параллельного приложений, реализующих алгоритм повышения контрастности на основе нечетких множеств. Входными данными являются низкоконтрастные изображения разного размера, выходными данными – восстановленные изображения соответствующего размера.



Рис. 3. Исходное изображение-оригинал
Fig. 3. Original first-generation image

3. Проведение профилирования программного кода для определения общего времени выполнения и времени выполнения последовательной части кода в обеих реализациях, времени работы параллельной секции в соответствующей реализации.

4. Анализ полученных данных.

Для проведения экспериментов подготовлена база изображений, полученных из 14 высококонтрастных снимков, имеющих различные гистограммы. Пример

одного из них представлен на рис. 3. Гистограммы монохромных вариантов некоторых изображений из подготовленной базы представлены на рис. 4.

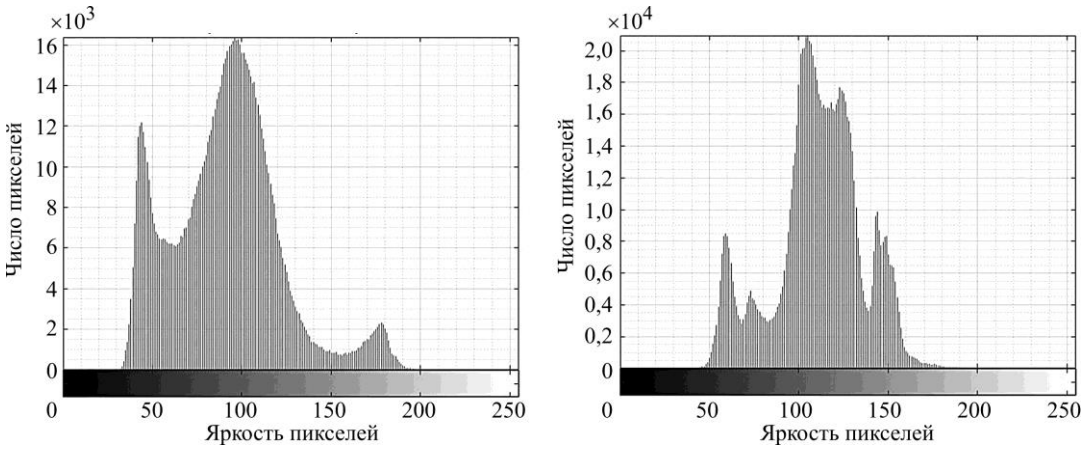


Рис. 4. Гистограммы монохромных изображений-оригиналов
Fig. 4. Histograms of monochrome original images

Создан набор низкоконтрастных монохромных копий каждого оригинального изображения размером $N \times N$, где N – длина стороны изображения, пиксель, $N \in \{100,...,5000\}$. Для каждого изображения подготовлено по 50 монохромных копий разного размера с искусственно пониженной в несколько раз контрастностью. Понижение проводилось следующим образом: яркость каждого пикселя была уменьшена в N раз, где N – случайное целое число в диапазоне [2, 10], затем к яркости каждого пикселя добавлено некоторое случайное целое число M, которое смещало гистограмму изображения. Пример таких изображений приведен на рис. 5. Примеры гистограмм изображений, полученных в результате искусственного понижения контрастности, представлены на рис. 6.



Рис. 5. Монохромные копии изображения разного размера: *а* – 100 × 100 пикселей;
б – 200 × 200 пикселей; *в* – 300 × 300 пикселей
Fig. 5. Monochrome copies of the image of different sizes: *a* – 100 × 100 pixels;
b – 200 × 200 pixels; *c* – 300 × 300 pixels

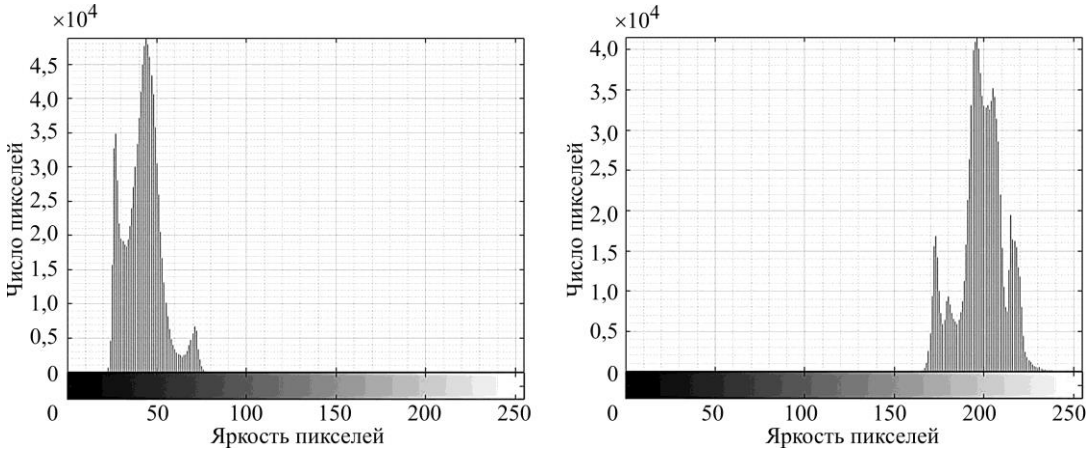


Рис. 6. Гистограммы низкоконтрастных копий изображений
Fig. 6. Histograms of low-contrast copies of images

Программная реализация алгоритма. Для проведения экспериментов разработаны приложения, реализующие последовательный и параллельный варианты алгоритма повышения контрастности на основе нечетких множеств. Для обеих реализаций проведено профилирование, в ходе которого измерены временные параметры и затраты памяти при одинаковых входных данных.

Для качественного и количественного сравнения эффективности вариантов реализации алгоритма его параллельная версия запущена на графическом процессоре Nvidia GeForce GTX 1060 6 Gb. Последовательная версия алгоритма повышения контрастности на основе нечетких множеств и метод линеаризации гистограммы исполнены на двухъядерном процессоре Intel Core i5 с тактовой частотой 2 ГГц. Для исключения влияния времени интерпретации программ и их составляющих как для последовательной, так и для параллельной реализаций применена программная система LLVM (Low Level Virtual Machine), реализованная на базе свободно распространяемого программного пакета Numba [6].

Результаты экспериментов. Пример результатов экспериментов, полученных для одного из изображений, показан на рис. 7.



а ***б*** ***в***

Рис. 7. Исходное низкоконтрастное изображение размером 200 × 200 пикселей (*а*), изображение, восстановленное с помощью алгоритма повышения контрастности (*б*), и изображение, восстановленное с помощью метода линеаризации гистограммы (*в*)
Fig. 7. Original low-contrast image sized 200 × 200 pixels (*a*), image restored using contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets (*b*) and image restored using the histogram linearization method (*c*)

Для оценки эффективности восстановления изначальной контрастности [7] кроме визуальной оценки рекомендуется использовать характеристику индекса структурного сходства SSIM [8]. Этот индекс имеет более точную связь получаемого результата с визуальной оценкой в отличие от индекса PSNR, оценивающего отношение пикового уровня сигнала к шуму, при котором невозможно согласовать получаемый результат с «физиологией человеческого восприятия» [7].

Согласно [8] индекс структурного сходства между соответствующими частями x и y двух изображений является произведением таких трех компонентов, как яркость (luminance), контрастность (contrast) и структурная связность (structure):

$$\mathrm{SSIM}(x,y)=\left[l(x,y)\right]^{\alpha}\cdot\left[c(x,y)\right]^{\beta}\cdot\left[s(x,y)\right]^{\gamma}, \tag{4}$$

$$l(x,y)=\frac{2\mu_x\mu_y+C_1}{\mu_x^{\,2}+\mu_y^{\,2}+C_1},$$

$$c(x,y)=\frac{2\sigma_x\sigma_y+C_2}{\sigma_x^{\,2}+\sigma_y^{\,2}+C_2}, \tag{5}$$

$$s(x,y)=\frac{\sigma_{xy}+C_3}{\sigma_x\sigma_y+C_3},$$

где μ_x, μ_y, σ_x, σ_y, σ_{xy} – локальные средние значения, стандартные отклонения и перекрестная ковариация для соответствующих частей x, y двух изображений; $C_{1–3}$ – константы регуляризации.

Функция SSIM использует константы регуляризации, чтобы избежать нестабильности для областей изображения, где локальное среднее или стандартное отклонение близко к нулю. Поэтому для этих констант обычно применяют небольшие ненулевые значения [8]. В (4) показатели степеней α, β, $\gamma \in [0, 1]$ регулируют вклад соответствующей компоненты в вычисление оценки индекса структурного сходства. Если обнулить значения α и γ, а также установить $\beta = 1$, то единственная компонента, вносящая вклад в вычисление оценки SSIM, будет контрастная составляющая.

Приведем средние значения индекса SSIM: восстановлен с помощью алгоритма повышения контрастности 0,9533; с применением линеаризации гистограммы (эквализации) 0,8113; для искаженного изображения по отношению к оригиналу 0,4982. Отметим, что в рассматриваемом случае SSIM учитывает только контрастную составляющую восстановленного изображения (5). SSIM-индекс принимает значения в диапазоне [0, 1]. Чем ближе результат к единице, тем лучше работает алгоритм восстановления контрастности изображений. Средние значения SSIM получены для 14 изображений с различными гистограммами. Данные показывают, что контрастность восстановленных с помощью алгоритма изображений выше по сравнению с методом эквализации.

Для оценки производительности алгоритмов восстановления контрастности на практике используется временная оценка сложности алгоритма. Согласно теории нотация «O» большое для метода линеаризации гистограммы оценивается как линейная. Это подтверждается и практическим экспериментом (рис. 8). Время восстановления контрастности с помощью алгоритма повышения контрастности при последовательной реализации также увеличивается линейно с увеличением размера изображения (рис. 9).

Сравнивая результаты работы двух методов (см. рис. 8 и 9), можно прийти к выводу, что последовательный вариант алгоритма повышения контрастности приблизительно в два раза медленнее метода эквализации, что делает такую реализацию невыгодной

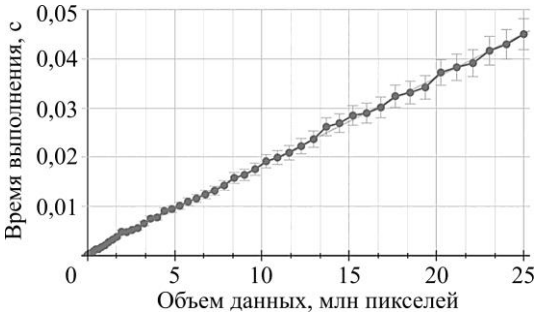


Рис. 8. Время коррекции контрастности методом линеаризации гистограммы в зависимости от объема данных

Fig. 8. Contrast correction time using the histogram linearization method on the data volume

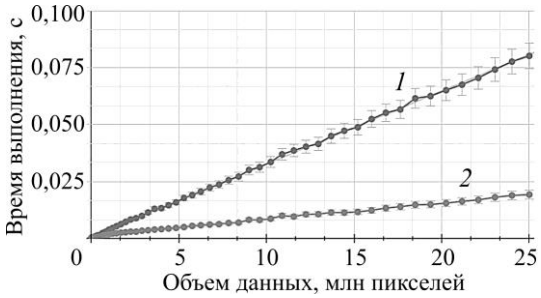


Рис. 9. Время выполнения последовательной (кривая *1*) и параллельной (кривая *2*) реализаций алгоритма повышения контрастности на основе нечетких множеств в зависимости от объема данных

Fig. 9. Execution time of sequential (curve *1*) and parallel (curve *2*) implementations of the contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets on the data volume

с точки зрения скорости вычислений и практически неприменимой в потоковой видеообработке. Этим подтверждается практический интерес к параллелизации данного алгоритма. Параллельный участок оказывает наибольшее влияние на время выполнения всего кода параллельной реализации. Строго последовательный участок вычислений как в последовательной, так и в параллельной реализациях зависит от объема входных данных. В проведенных экспериментах время выполнения последовательного участка достигает 0,3 мс при объеме входных данных 25 млн пикселей. Параллельный алгоритма повышения контрастности работает приблизительно в 2,5 раза быстрее, чем эквализация. Асимптотическая сложность алгоритма при линейной аппроксимации представленного участка оценивается как сублинейная $O(n^c)$ при $0 < c < 1$, что согласуется с теоретической оценкой для параллельных алгоритмов [9, 10].

Для точной оценки коэффициента ускорения S_p параллельной реализации алгоритма исследована его зависимость (рис. 10) от размеров входного изображения: $S_p = \tau_{seq} / \tau_{par}$, где τ_{seq}, τ_{par} – время выполнения последовательной (sequential) и параллельной (parallel) реализаций алгоритма соответственно.

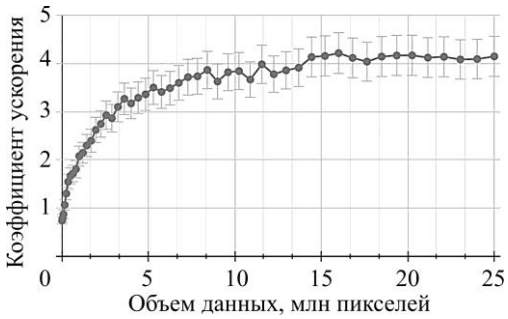


Рис. 10. Эффективность параллельной реализации алгоритма повышения контрастности на основе нечетких множеств

Fig. 10. Efficiency of parallel implementation of the contrast enhancement algorithm based on fuzzy sets

Зависимость, представленная на рис. 10, показывает, что коэффициент ускорения имеет область насыщения, после которой ускорение не растет. В этой области скорость обработки кадра параллельной реализацией более чем в четыре раза выше скорости обработки последовательной реализацией алгоритма. Эффект, по причине которого возникает область насыщения, связан как с законом Амдала [11], так и с увеличением времени загрузки и выгрузки данных при вычислениях на графическом процессоре [12].

Заключение. Результаты, полученные в ходе экспериментов, позволяют утверждать, что предобработка изображения с помощью алгоритма повышения контрастности на основе нечетких множеств имеет практическую ценность в задаче потоковой обработки видеоданных при его параллельной реализации. Это предъявляет более высокие требования к вычислительному блоку мобильной системы, в которую данный алгоритм может быть встроен. Однако такие затраты оправдываются, и оценка индекса структурного сходства показывает, что качество восстановления у данного алгоритма действительно лучше, чем у часто применяемой на практике эквализации гистограммы. Параллельная реализация алгоритма повышения контрастности на основе нечетких множеств имеет асимптотическую сложность, которая оценивается как сублинейная.

Совокупность полученных результатов позволяет предположить, что на практике следует комбинировать разные подходы, используя сильные стороны каждого из двух методов: скорость метода линеаризации гистограммы и качество коррекции контрастности с помощью рассматриваемого алгоритма на основе нечетких множеств. Возможность реализации таких гибридных методов будет рассмотрена в ходе дальнейших исследований.

Литература

1. ***Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е.*** Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2019. 1104 с.

2. ***Умняшкин С. В., Лесин В. В.*** Основы цифровой обработки изображений: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2016. 200 с.

3. ***Appiah O., Hayfron-Acquah J. B.*** Fast generation of image's histogram using approximation technique for image processing algorithms // IJIGSP. 2018. Vol. 10. No. 3. P. 25–35. https://doi.org/10.5815/ijigsp.2018.03.04

4. ***Новиков Ю. И., Лупин С. А.*** Применение яркостных преобразований для предобработки неректифицированной пары изображений // Электронные информационные системы. 2022. № 3 (34). С. 28–43. EDN: TTWKDX.

5. ***Бураков Д. П.*** Этап дефаззификации нечеткого вывода: традиционный и байесовский логико-вероятностный подходы // XXII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2019): сб. докладов. Т. 1. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 39–42.

6. Numba documentation // Numba [Электронный ресурс]. URL: https://numba.readthedocs.io/en/stable/index.html (дата обращения: 04.09.2024).

7. ***Никин В. В., Гарина С. В.*** Обзор методов и средств оценки качества кадров в видеофайле // International Journal of Professional Science. 2020. № 11. С. 56–63. EDN: RPVVGR.

8. ***Старовойтов В. В.*** Уточнение индекса SSIM структурного сходства изображений // Информатика. 2018. Т. 15. № 3. С. 41–55. EDN: XZOOHR.

9. ***Стивенс Р.*** Алгоритмы: Теория и практическое применение / пер. В. Кириленко, Р. Волошко. М.: Эксмо, 2016. 542 с.

10. ***Скиена С.*** Алгоритмы: Руководство по разработке. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 719 с.

11. ***Тоуманен Б.*** Программирование GPU при помощи Python и CUDA / пер. с англ. А. В. Борескова. М.: ДМК Пресс, 2020. 253 с.

12. ***Сандерс Дж., Кэндрот Э.*** Технология CUDA в примерах: Введение в программирование графических процессоров / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2018. 232 с.

Статья поступила в редакцию 09.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 14.05.2024 г.; принята к публикации 10.10.2024 г.

Информация об авторах

Новиков Юрий Иванович – аспирант, ассистент Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), jury.novikov@mail.ru

Лупин Сергей Андреевич – кандидат технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lupin@miee.ru

Савченко Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sas@olvs.miee.ru

Звонарев Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, инженер-программист «ИП Звонарев Владимир Александрович» (Россия, 300040, г. Тула, ул. Ложевая, 133-96), zvonarev@cz71.ru

References

1. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital image processing.* 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson Education, 2007. 976 p.

2. Umnyashkin S. V., Lesin V. V. *Fundamentals of digital image processing,* study guide. Moscow, MIET, 2016. 200 p. (In Russian).

3. Appiah O., Hayfron-Acquah J. B. Fast generation of image's histogram using approximation technique for image processing algorithms. *IJIGSP*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 25–35. https://doi.org/10.5815/ijigsp.2018.03.04

4. Novikov Yu. I., Lupin S. A. Application of brightness transformations for pre-processing of a non-rectified image pair. *Elektronnyye informatsionnyye sistemy = Electronic Information Systems*, 2022, no. 3 (34), pp. 28–43. (In Russian). EDN: TTWKDX.

5. Burakov D. P. The defuzzification stage of fuzzy inference: traditional and Bayesian logical-probabilistic approaches. *XXII Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM-2019),* proceedings. Vol. 1. St. Petersburg, Saint Petersburg ETU, 2019, pp. 39–42. (In Russian).

6. Numba documentation. *Numba*. Available at: https://numba.readthedocs.io/en/stable/index.html (accessed: 04.09.2024).

7. Nikin V. V., Garina S. V. Review of methods and tools for assessing the quality of frames in a video file. *International Journal of Professional Science,* 2020, no. 11, pp. 56–63. (In Russian). EDN: RPVVGR.

8. Starovoitov V. V. Enhancement of the structural similarity index SSIM. *Informatika = Informatics*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 41–55. (In Russian). EDN: XZOOHR.

9. Stephens R. *Essential algorithms: A practical approach to computer algorithms.* Hoboken, NJ, Wiley, 2013. 624 p.

10. Skiena S. S. *The algorithm design manual.* London, Springer, 2008. xvi, 730 p. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-070-4

11. Tuomanen B. *Hands-on GPU programming with Python and CUDA.* Birmingham, Packt Publ., 2018. 310 p.

12. Sanders J., Kandrot E. *CUDA by example: An introduction to general-purpose GPU programming.* Upper Saddle River, NJ, Addison-Wesley, 2010. 320 p.

The article was submitted 09.02.2024; approved after reviewing 14.05.2024;
accepted for publication 10.10.2024.

Information about the authors

Yury I. Novikov – PhD student, Assistant of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124482, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), jury.novikov@mail.ru

Sergey A. Lupin – Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124482, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), lupin@miee.ru

Yury V. Savchenko – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124482, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sas@olvs.miee.ru

Dmitry A. Zvonarev – Cand. Sci. (Eng.), Software Engineer, "Individual Entrepreneur Zvonarev Vladimir Aleksandrovich" (Russia, 300040, Tula, Lozhevaya st., 133-96), zvonarev@cz71.ru

ЮБИЛЕИ

Гаврилову Сергею Витальевичу – 65 лет



16 декабря 2024 г. исполняется 65 лет Гаврилову Сергею Витальевичу, специалисту в области автоматизированных систем проектирования микроэлектронных систем и электронной элементной базы информационных систем, доктору технических наук, профессору.

В 1983 г. С. В. Гаврилов окончил факультет управления и прикладной математики Московского физико-технического института. В 1997 г. Сергей Витальевич защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 2007 г. – на соискание ученой степени доктора технических наук. В 2013 г. С. В. Гаврилову присвоено звание профессора.

С 1994 г. Сергей Витальевич работает в Институте проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН). С 2019 по 2024 г. С. В. Гаврилов – директор ИППМ РАН.

С 2024 г. С. В. Гаврилов руководит Отделением проблем проектирования в микроэлектронике в составе Курчатовского комплекса нано-, био-, инфо-, когнитивных и социогуманитарных (НБИКС) наук и природоподобных технологий, созданного в НИЦ «Курчатовский институт».

В МИЭТ Сергей Витальевич работает с 2009 г.: профессор кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем (2009–2023), исполняющий обязанности заведующего кафедрой проектирования и конструирования интегральных микросхем (2018–2023). С 2023 г. по настоящее время С. В. Гаврилов – профессор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева. С. В. Гаврилов разработал и читает лекционные курсы по дисциплине «Спецглавы САПР» для магистрантов, обучающихся по программе «Автоматизированное проектирование СБИС и систем на кристалле».

С. В. Гаврилов – высококвалифицированный специалист, получивший международное признание в области моделирования и оптимизации СБИС. Неоднократно выступал с докладами на международных конференциях ICCAD и ISQED (Сан-Хосе, США), DATE (Париж, Франция), а также с лекциями и семинарами по приглашению таких ведущих компаний в области проектирования и разработки микросхем, как Motorola и Freescale (Остин, США), Intel (Хайфа, Израиль).

Результаты научных исследований С. В. Гаврилова изложены более чем в 200 научных публикациях (из них 2 монографии). Под руководством С. В. Гаврилова подготовлено 10 кандидатов наук.

С. В. Гаврилову присвоено почетное звание лауреата премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2015 г.), он награжден медалью Минобрнауки России «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технического развития» (2021 г.).

Поздравляем Сергея Витальевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов в научной и педагогической деятельности!

Редколлегия

Тематический указатель статей, опубликованных в 2024 году

Фундаментальные исследования

Верюжский И. В., Приходько А. С., Усков Ф. А., Григорашвили Ю. Е., Боргардт Н. И. Импульсное лазерное осаждение монокристаллических пленок сплава Гейслера Co-FeMnSi на подложке MgO. **Т. 29, № 6, с. 703–714.**

Григорьева Т. В., Голубков С. А., Бойко А. Н. Исследование *p–i–n*-диодных структур на высокоомных кремниевых подложках методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней. **Т. 29, № 4, с. 411–419.**

Сазонов В. А., Боргардт Н. И., Приходько А. С., Казаков И. П., Клековкин А. В. Исследование структуры слоев GaAs в гетерокомпозициях GaAs/Ge/GaAs методами просвечивающей электронной микроскопии. **Т. 29, № 5, с. 559–574.**

Материалы электроники

Баглов А. В., Хорошко Л. С., Силибин М. В., Карпинский Д. В. Электронная структура ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$. **Т. 29, № 1, с. 19–29.**

Глухенькая В. Б., Пестов Г. Н., Гулидова А. И., Сауров М. А., Смирнов П. А., Федянина М. Е., Козлов А. О., Савицкий А. И. Кристаллизация тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с помощью тонкопленочного резистивного нагревательного элемента для создания оптоэлектронных и интегрально-оптических элементов и устройств на их основе. **Т. 29, № 3, с. 267–280.**

Налимова С. С., Шомахов З. В., Мошников В. А. Разработка слоев на основе оксида молибдена для полупроводниковых газовых датчиков. **Т. 29, № 2, с. 139–146.**

Пепеляев Д. В., Корчагин Е. П., Штерн М. Ю., Рогачёв М. С., Терехов Д. Ю., Бурзин С. Б., Штерн Ю. И., Шерченков А. А. Исследование концентрации и подвижности носителей заряда в наноструктурированных термоэлектрических материалах на основе PbTe и GeTe. **Т. 29, № 2, с. 147–157.**

Скрипаль А. В., Трунилин Н. А., Яфаров Р. К. Влияние инжекции электронов и температуры на газовую чувствительность алмазографитовых пленочных структур к парам воды. **Т. 29, № 5, с. 575–584.**

Тарасов Д. В., Соколов Е. М., Гаврилов С. А. Исследование процесса многослойного роста поликристаллических кремниевых слоев для управления деформацией кремниевых структур в технологии химического газового транспорта. **Т. 29, № 6, с. 715–723.**

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. **Т. 29, № 4, с. 420–431.**

Шомахов З. В., Налимова С. С., Гукетлов А. М., Кондратьев В. М., Мошников В. А. Управление свойствами адсорбционных центров при формировании газочувствительных структур смешанных оксидов. **Т. 29, № 1, с. 7–18.**

Технологические процессы и маршруты

Грабов А. Б., Рискин Д. Д., Суздальцев С. Ю., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А. Исследование роли гидростатических эффектов в слое расплава олова в формировании вакуумно-плотного SLID-соединения Cu-Sn. **Т. 29, № 2, с. 168–174.**

Грудцов В. П., Еганова Е. М., Губанова О. В., Горячев А. В., Пучнин К. В., Рязанцев Д. В., Кузнецов А. Е., Комарова Н. В. Атомно-слоевое осаждение оксида тантала для сенсоров на основе полевого эффекта. **Т. 29, № 6, с. 724–735.**

Жангиреев Д., Шемякин А. В., Белостоцкая С. О., Сивченко А. С. Методика оптимизации электрофизических характеристик МОП-транзистора с использованием приборно-технологического моделирования. **Т. 29, № 5, с. 585–594.**

Лавров И. В., Дронова Д. А., Силибин М. В., Аникин А. В., Дубков С. В., Лебедев Е. А., Шарипов Р. А., Вигдорович Е. Н., Громов Д. Г. Моделирование дифракционных эффектов при использовании фазосдвигающих слоев в фотолитографии. **Т. 29, № 6, с. 736–751.**

Лазаренко П. И. Измерительный комплекс для исследования температурных зависимостей электрического сопротивления халькогенидных материалов в твердом и жидком состояниях. **Т. 29, № 2, с. 158–167.**

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. **Т. 29, № 4, с. 447–455.**

Пак К. И., Сорокина Л. И., Кузьмин А. В., Рязанов Р. М., Кицюк Е. П., Дубков С. В., Громов Д. Г. Формирование композитных слоев TiO_2-ZnO с повышенной фоточувствительностью методом электрофоретического осаждения. **Т. 29, № 3, с. 290–299.**

Румянцев А. В., Боргардт Н. И. Сравнение процессов распыления кремния и диоксида кремния фокусированным ионным пучком. **Т. 29, № 1, с. 30–41.**

Смоляков Н. В., Марченков Н. В., Лебедев А. М., Чумаков Р. Г., Гончаренко М. С., Дюжев Н. А. Моделирование источников рентгеновского излучения для станции фотолитографии на технологическом накопительном комплексе «Зеленоград». **Т. 29, № 3, с. 300–309.**

Титов А. Ю., Погалов А. И., Тимошенков С. П. Исследование конструкторско-технологических особенностей пространственной сборки и монтажа функционального микромодуля. **Т. 29, № 3, с. 281–289.**

Харламов Н. Р., Рябышенков А. С., Каракеян В. И. Применение интегральных показателей при оценке уровня экологической безопасности наукоемкой природно-технической геосистемы. **Т. 29, № 4, с. 456–465.**

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. **Т. 29, № 4, с. 432–446.**

Элементы интегральной электроники

Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Пространственные характеристики кремниевых фотоумножителей. **Т. 29, № 4, с. 466–477.**

Егоркин В. И., Чуканова О. Б. Нормально-закрытые GaN-транзисторы для комплементарной пары. **Т. 29, № 5, с. 616–624.**

Зеневич А. О., Кочергина О. В., Буслюк В. В., Федосюк Д. Н., Лущий Д. А. Температурные характеристики шумовых диодов. **Т. 29, № 5, с. 608–615.**

Максименко Ю. Н., Петросянц К. О., Силкин Д. С., Грабежова В. К. TCAD-моделирование транзистора со статической индукцией. **Т. 29, № 4, с. 489–503.**

Максименко Ю. Н., Петросянц К. О., Силкин Д. С., Грабежова В. К. Высокочастотная модель транзистора со статической индукцией. **Т. 29, № 6, с. 772–786.**
Мефтахутдинов Р. М. Моделирование транзистора с плавающим затвором на основе ван-дер-ваальсового гетероперехода графен/h-BN/MoS_2. **Т. 29, № 4, с. 478–488.**
Пилькевич А. В., Садков В. Д. Влияние импульсной мощности на параметры пленочных поглощающих элементов. **Т. 29, № 2, с. 175–184.**
Рехвиашвили С. Ш., Гаев Д. С. Исследование влияния оптического излучения на интегральную микросхему ТТЛ-типа. **Т. 29, № 3, с. 310–318.**
Сауров М. А., Лакалин А. В., Путря М. Г. Расчет КПД фотодиода при наличии генерации и рекомбинации в области пространственного заряда. **Т. 29, № 5, с. 595–607.**
Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Егоркин В. И., Котляров Е. Ю., Лосев В. В., Чаплыгин Ю. А. Исследование зависимостей входных параметров нормально-закрытого GaN-HEMT-транзистора от режимов работы в гигагерцовом диапазоне. **Т. 29, № 6, с. 763–771.**
Ходаков А. М., Сергеев В. А., Фролов И. В., Радаев О. А., Зайцев С. А. Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в светодиодных матрицах. **Т. 29, № 6, с. 752–762.**
Штерн Ю. И., Штерн М. Ю., Рогачев М. С., Кожевников Я. С. Термоэлектрические системы для прецизионного регулирования температуры. **Т. 29, № 5, с. 625–639.**

Схемотехника и проектирование

Аубакиров Р. Р., Гуров К. О., Данилов А. А. Алгоритм проектирования *LC*-контуров с параллельной компенсацией в приемном контуре для систем индуктивного питания. **Т. 29, № 3, с. 319–330.**
Бибило П. Н., Кардаш С. Н., Романов В. И. Выбор блочных покрытий при схемной реализации разреженных систем дизъюнктивных нормальных форм булевых функций. **Т. 29, № 5, с. 658–678.**
Babajanyan H. A., Khudaverdyan S. Kh. Optimization of the audio-frequency voltage-controlled oscillato
(***Бабаджанян А. А., Худавердян С. Х.*** Оптимизация аудиочастотного генератора, управляемого напряжением). **Т. 29, № 1, с. 42–51.**
Волобуев П. С., Коршунов А. В., Семенов А. Н. Интегральный регулятор напряжения, стабильный к шумам по цепям питания. **Т. 29, № 4, с. 504–513.**
Колесников Е. Б. Умножители частоты гармонического сигнала на управляемом фазовращателе. **Т. 29, № 1, с. 52–64.**
Малинаускас К. К. Алгоритм динамического программирования для оптимизации дерева буферизации по числу буферов и инверторов. **Т. 29, № 6, с. 792–804.**
Матешева В. В., Попов В. Д. Изменение характеристик аналогового выходного каскада при воздействии низкоинтенсивного излучения. **Т. 29, № 6, с. 787–791.**
Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А., Харитонов И. А., Корнеев С. В., Дюканов П. А., Смирнов Д. С., Вологдин Э. Н. Анализ влияния радиационных эффектов на характеристики операционного усилителя с использованием универсальной SPICE-RAD-модели биполярных транзисторов. **Т. 29, № 5, с. 640–657.**
Петросянц К. О., Харитонов И. А., Тегин М. С. Моделирование электротепловых переходных процессов в мощных электронных схемах на печатных платах с использованием программного обеспечения Comsol, Spice, «Асоника-ТМ». **Т. 29, № 1, с. 65–78.**
Чистяков А. Ю., Заплетина М. А. Деревья обратного прохода на смешанном коммутационном графе для ускоренной трассировки ПЛИС. **Т. 29, № 2, с. 185–193.**

Шумарин С. В., Фролова Т. Н. Модификация SPICE-моделей КМОП-микросхем для имитации частотного отклика кольцевого генератора на низкоинтенсивное ионизирующее облучение. **Т. 29, № 4, с. 514–524.**

Микро- и наносистемная техника

Борисов А. Г., Ильяшева Е. В., Осипенкова Н. Г. Определение температурной погрешности оптического датчика плотности электролита для аккумуляторов. **Т. 29, № 1, с. 89–97.**

Галкин А. А., Еркин П. В., Захаров В. П., Соломкина Н. А., Тимошенков А. С., Тимошенков С. П. Применение инерциальных МЭМС-модулей в сканирующей LiDAR-системе. **Т. 29, № 3, с. 331–345.**

Кочурина Е. С., Виноградов А. И., Боев Л. Р., Зарянкин Н. М., Анчутин С. А., Дернов И. С., Тимошенков А. С., Тимошенков С. П. Технологические аспекты изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков удара. **Т. 29, № 1, с. 79–88.**

Челышев Л. С., Тимошенков С. П., Плис Н. И., Орлов В. О. Многофункциональный сенсорный модуль повышенной защищенности со спутниковой навигацией. **Т. 29, № 2, с. 194–202.**

Чугунов Е. Ю., Тимошенков С. П., Погалов А. И. Разработка и исследование многокристальных микросистем на основе модульной трехмерной интеграции кристаллов. **Т. 29, № 1, с. 98–107.**

Интегральные радиоэлектронные устройства

Бабушкин Е. А., Калашников Р. В., Лаврентьев А. М., Зайцев С. А., Смолев И. А. Методика оценки количества источников излучения в условиях амплитудно-фазовой неидентичности. **Т. 29, № 6, с. 805–818.**

Зикий А. Н., Кочубей А. С. Исследование характеристик управляемого генератора 10-см диапазона. **Т. 29, № 2, с. 203–209.**

Маслаков М. П., Лыков О. В. Разработка устройства для получения высококачественного синусоидального переменного напряжения. **Т. 29, № 4, с. 525–538.**

Раннев Н. Ю., Кондратенко С. В., Байков В. Д., Дубинский А. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В. Варианты реализации устройств восстановления тактовых сигналов и данных в составе КМОП высокоскоростных приемопередатчиков последовательных каналов. Обзор. **Т. 29, № 3, с. 346–361.**

Биомедицинская электроника

Аубакиров Р.Р., Данилов А.А. Использование эффекта сильной связи для уменьшения размера принимающей катушки без понижения устойчивости системы индуктивной передачи энергии к имплантатам. **Т. 29, № 6, с. 819–831.**

Буянов Д. А., Шалаев П. В., Монахова П. А., Герасименко А. Ю. Мониторинг оксигенации гемоглобина с помощью прибора NIRS4 и разработанного алгоритма. **Т. 29, № 2, с. 223–235.**

Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П., Погодин В. Р., Лазба Ф. Б. Разработка портативной системы длительного кардиомониторирования на основе емкостных биосенсоров и эластичных межсоединений. **Т. 29, № 2, с. 210–222.**

Селютина Е. В., Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Влияние паразитных компонентов и нагрева конденсаторов на адаптивную подстройку усилителя мощности в системе индуктивного питания медицинских имплантатов. **Т. 29, № 1, с. 108–117.**

Информационно-коммуникационные технологии

Бордюжа В., Брейкина К. В., Умняшкин С. В. Автоматизация определения числа итераций в задаче восстановления смазанных изображений методом Люси – Ричардсона. **Т. 29, № 4, с. 539–550.**
Воеводин В. А. О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. I. Постановка задачи. **Т. 29, № 2, с. 249–256.**
Воеводин В. А. О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. II. Аналитическая математическая модель. **Т. 29, № 3, с. 393–402.**
Городилов А. В., Чирков А. В. Разработка модели гибридной экспертной системы для современного промышленного производства. **Т. 29, № 3, с. 362–367.**
Гундарцев М. А., Семенов М. Ю., Калашников В. С., Королев В. В., Константинова А. А. Особенности разработки программной документации по стандартам ЕСПД для САПР микроэлектроники. **Т. 29, № 5, с. 687–693.**
Ефанов Д. В. Особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе метода инвертирования данных. **Т. 29, № 3, с. 379–392.**
Лубенцов А. В. Синтез иерархической многоуровневой модели параметров для оценки эффективности системы защиты информации в условиях неопределенных данных. **Т. 29, № 2, с. 236–248.**
Лубенцов А. В. Синтез метода оценки эффективности системы информационной безопасности. **Т. 29, № 1, с. 118–129.**
Новиков Ю. И., Лупин С. А., Савченко Ю. В., Звонарев Д. А. Параллельная реализация алгоритма повышения контрастности изображения на основе нечетких множеств. **Т. 29, № 6, с. 832–844.**
Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Конюхов Е. В. Управление параметрами исполнительного оборудования при автоматизации сборочных операций. **Т. 29, № 5, с. 679–686.**
Шевцов В. А., Казачков В. О., Летфуллин И. Р. Исследование эффективности нелинейного сетевого кодирования. **Т. 29, № 3, с. 368–378.**

Юбилеи

Гаврилову Сергею Витальевичу – 65 лет. **Т. 29, № 6, с. 845.**
Лабунову Владимиру Архиповичу – 85 лет. **Т. 29, № 2, с. 257.**
Петросянцу Константину Орестовичу – 80 лет. **Т. 29, № 2, с. 258.**

Конференции

XXXI Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием. **Т. 29, № 1, с. 130.**
Об итогах XXXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием. **Т. 29, № 3, с. 403–404.**
Об итогах International Conference “Functional Chalcogenides: Physics, Technology and Applications”. **Т. 29, № 5, с. 694.**
Юбилейный Российский форум «Микроэлектроника 2024». **Т. 29, № 4, 2-я стр. обложки.**

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