



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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 28

Vol. 28

№ 6

No. 6

ноябрь – декабрь

November – December

2023

ПОДПИСКА 2024

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

Периодичность журнала – 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: <http://ivuz-e.ru>



Известия высших учебных заведений.
ЭЛЕКТРОНИКА

Том 28, № 6, 2023
ноябрь – декабрь

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

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X

Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878

Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136

Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603

Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482

Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175

Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471

Горбачев Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X

Душкин Александр Викторович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971

Конюплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X

Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)

Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293

Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орёл, Россия),
ORCID: 0000-0001-7433-4140

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

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

Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0001-9074-385X

Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания),
ORCID: 0000-0002-1433-260X

Заведующая редакцией **И. М. Доронина**

Редактор **А. В. Тихонова**

Корректор **И. В. Проскурякова**

Верстка **А. Ю. Рыжков, С. Ю. Рыжков**

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

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

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

Подписано в печать 07.12.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 18,135 усл.печ.л., 15,552 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 26. 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 нанoeлектроники, 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

- Волков Р. Л., Боргардт Н. И.* Идентификация структуры наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций методами просвечивающей электронной микроскопии 711

Материалы электроники

- Аихотов О. Г., Аихотова И. Б., Магкоев Т. Т.* Резистивные свойства конструкционных стекол микроканальных пластин 727

- Горошко Д. Л., Гаврилин И. М., Дронов А. А., Горошко О. А., Волкова Л. С., Гревцов Н. Л., Чубенко Е. Б., Бондаренко В. П.* Электрический транспорт в пористых структурах Si-Ge/c-Si, сформированных электрохимическим осаждением германия в пористый кремний 734

- Громов Д. Г., Гаврилов С. А., Лебедев Е. А., Силибин М. В., Дубков С. В., Аникин А. В., Погалов А. И., Дронова Д. А., Бутманов Д. Д., Ширяев М. Е., Громов В. Д., Рязанов Р. М., Шарипов Р. А., Беспалов В. А.* Управление составом тонких пленок Mo-Si-N-O при реактивном магнетронном распылении 745

Технологические процессы и маршруты

- Голишиников А. А., Дюжев Н. А., Парамонов В. В., Потапенко И. В., Путря М. Г., Сомов Н. М., Чаплыгин Ю. А.* Исследование и разработка процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния со сниженной шероховатостью боковых стенок структур 762

- Корчагин Е. П., Нагрешников Е. В., Штерн М. Ю., Рогачев М. С., Мустафоев Б. Р., Штерн Ю. И.* Исследования факторов, влияющих на сопротивление контактов в термоэлементах 773

Схемотехника и проектирование

- Соболев В. А., Лосев В. В.* Разработка RTL-модели генератора псевдослучайных чисел на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью в каскаде Голлмана 784

- Крупкина Т. Ю., Лосев В. В., Беневоленский С. Б., Хлыбов А. И., Родионов Д. В.* Влияние потерь в соединениях при измерении коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра 794

- Раков А. В., Шевицов И. В., Борин О. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В.* Методика оценки S-параметров высокоскоростных путей передачи сигналов в корпусах микросхем 802

- Раннев Н. Ю., Кондратенко С. В., Дубинский А. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В.* Высокоскоростной перестраиваемый КМОП-усилитель-ограничитель для приемника сигнала оптической линии 814

- Петросяни К. О., Силкин Д. С., Попов Д. А., Исмаил-Заде М. Р., Харитонов И. А., Переверзев Л. Е., Морозов А. А., Турганев П. В.* Особенности TCAD- и SPICE-моделирования удара заряженной частицы в 6Т-ячейку статической памяти, изготовленную по КМОП-технологии с проектными нормами 28 нм 826

Информационно-коммуникационные технологии

- Ефанов Д. В., Погодина Т. С.* Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. II. Моделирование работы цифровых устройств при неисправностях... 838

- Тематический указатель статей, опубликованных в 2023 году 854

- К сведению авторов 859



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 28, No. 6, 2023
November – December

The scientific and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Physics of the NAS of Belarus (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471

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

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

Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-9074-385X

Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X

Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Optolink LLC (Moscow, Russia)

Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293

Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., 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”, 2023
© MIET, 2023

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 Microe-
lectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Andrey Y. Sazonov – PhD, Prof., University of Waterloo (Canada),
ORCID: 0000-0003-0974-1262
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia),
ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
Orel State University named after I. S. Turgenev (Orel, Russia),
ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological
University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vyacheslav V. Svetukhin – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
SMC “Technological Centre” (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow,
Russia), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia),
ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain),
ORCID: 0000-0002-1433-260X

Head of editorial staff *Doronina I. M.*

Chief editors *Tikhonova A. V., Proskuryakova I. V.*

Make-up *Ryzhkov S. Yu., Ryzhkov A. Yu.*

Editorial Board’s address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET,
editorial office of the Journal “Proceedings of Universities. Electronics”.

Tel.: +7-499-734-62-05, **e-mail:** magazine@miec.ru, **website:** <http://ivuz-e.ru>

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

Signed to print 07.12.2023. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed
sheets 18,135. Number of copies 130. Order no. 26. 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 candi-
date 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.

CONTENTS

Fundamental researches

- Volkov R. L., Borgardt N. I.* Multilayered nanoscale heterocompositions structure study using transmission electron microscopy 711

Electronics materials

- Ashkhotov O. G., Ashkhotova I. B., Magkoev T. T.* Resistive properties of structural glasses of microchannel plates 727
- Goroshko D. L., Gavrilin I. M., Dronov A. A., Goroshko O. A., Volkova L. S., Grevtsov N. L., Chubenko E. B., Bondarenko V. P.* Electrical transport in porous Si-Ge/c-Si structures formed by electrochemical deposition of germanium into porous silicon 734
- Gromov D. G., Gavrilov S. A., Lebedev E. A., Silibin M. V., Dubkov S. V., Anikin A. V., Pogalov A. I., Dronova D. A., Butmanov D. D., Shiryaev M. E., Gromov V. D., Ryazanov R. M., Sharipov R. A., Bepalov V. A.* Composition control of Mo-Si-N-O thin films during reactive magnetron sputtering..... 745

Technological processes and routes

- Golishnikov A. A., Dyuzhev N. A., Paramonov V. V., Potapenko I. V., Putrya M. G., Somov N. M., Chaplygin Yu. A.* Research and development of the deep anisotropic silicon plasma etching process with reduced sidewall roughness of the structures 762
- Korchagin E. P., Nagreshnikov E. V., Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Mustafaev B. R., Shtern Yu. I.* Research of factors impacting contact resistance in thermoelements 773

Circuit engineering and design

- Sobolev V. A., Losev V. V.* Development of an RTL model of a pseudorandom number generator based on nonlinear feedback shift registers in a Gollmann cascade 784
- Krupkina T. Yu., Losev V. V., Benevolenskiy S. B., Khlybov A. I., Rodionov D. V.* Influence of cable loss on gain and noise figure measured using spectrum analyzer 794
- Rakov A. V., Shevtsov I. V., Borin O. V., Gorshkova N. M., Skok D. V.* Methodology for estimating S-parameters of high-speed signal transmission paths in chip packages 802
- Rannev N. Yu., Kondratenko S. V., Dubinsky A. V., Gorshkova N. M., Skok D. V.* High-speed tunable CMOS limiter amplifier for optical line signal receiver 814
- Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A., Ismail-Zade M. R., Kharitonov I. A., Pereverzev L. E., Morozov A. A., Turgenev P. V.* Features of TCAD and SPICE simulation of a charged particle impact into a 6T SRAM cell manufactured using CMOS 28nm technology node..... 826

Information-communication technologies

- Efanov D. V., Pogodina T. S.* Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code. II. Modeling the operation of digital devices in case of faults 838
- Thematic index of articles published in 2023..... 854
- Instructions for authors 859

Научная статья
УДК 620.187.3:548.4
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-6-711-726
EDN: QGSIPY

**Идентификация структуры
наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций
методами просвечивающей электронной микроскопии**

Р. Л. Волков, Н. И. Боргардт

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

r.l.volkov@org.miet.ru

Аннотация. Методы просвечивающей электронной микроскопии и высокоразрешающей электронной микроскопии, применяемые для исследования многослойных гетерокомпозиций, имеют ограничения в разрешающей способности, не позволяют эффективно исследовать аморфные материалы и требуют анализа множества локальных участков в случае образцов, состоящих из отдельных кристаллитов. В работе исследована многослойная гетерокомпозиция, представляющая собой фазосдвигающий фотошаблон и состоящая из слоев наноразмерной толщины на поверхности стеклянной подложки. Для исследования тонкой фольги поперечного и продольного сечений применены методы фокусированного ионного пучка. Для идентификации структуры и определения состава слоев использованы методы просвечивающей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Анализ фольги поперечного сечения, приготовленной с использованием стандартных подходов, позволил визуализировать, измерить толщины и определить составы слоев. Показано, что на подложке SiO₂ сформирован аморфный слой Mo_{0,06}Si_{0,31}N_{0,63} толщиной 93 нм, который последовательно покрыт поликристаллическими слоями Cr_{0,56}N_{0,44}, Cr_{0,74}C_{0,06}N_{0,2} и Cr_{0,4}N_{0,26}O_{0,3} толщиной 22, 37 и 8 нм соответственно. Тонкая фольга планарного сечения, приготовленная под небольшим наклоном к поверхности фотошаблона, позволила сформировать сечения всех слоев с размерами, достаточными для их исследования методом микродифракции электронов. Выполненный электрографический анализ подтвердил аморфную структуру подложки и слоя Mo_{0,06}Si_{0,31}N_{0,63}, а также показал, что поликристаллические слои Cr_{0,56}N_{0,44}; Cr_{0,74}C_{0,06}N_{0,2}; Cr_{0,4}N_{0,26}O_{0,3} образованы кристаллитами с кубической решеткой и параметрами 3,92; 4,18; 4,12 Å соответственно.

Ключевые слова: наноструктуры, просвечивающая электронная микроскопия, микродифракция электронов, фокусированный ионный пучок

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2023-0014) и с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов».

Для цитирования: Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Идентификация структуры наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций методами просвечивающей электронной микроскопии // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 711–726. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-711-726>. – EDN: QGSIPY.

Original article

Multilayered nanoscale heterocompositions structure study using transmission electron microscopy

R. L. Volkov, N. I. Borgardt

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

r.l.volkov@org.miet.ru

Abstract. Transmission electron microscopy and high-resolution electron microscopy methods used to study multilayered heterocompositions don't allow for effective studying of amorphous materials and require the analysis of many local zones in case of specimens that consist of separate crystallites. In this work, a multilayered heterocomposition, which is a phase-shifting photomask consisting of nanoscale thickness layers on the surface of a glass substrate, is studied. Focused ion beam methods were used to make a preparation of normal and longitudinal cross section thin foils. Normal cross section foil prepared using standard approaches allowed for layers visualization, thickness measurement and composition analysis. It was demonstrated that a 93 nm thick amorphous layer of $\text{Mo}_{0.06}\text{Si}_{0.31}\text{N}_{0.63}$ is formed on the SiO_2 substrate, which is successively covered by polycrystalline layers of $\text{Cr}_{0.56}\text{N}_{0.44}$, $\text{Cr}_{0.74}\text{C}_{0.06}\text{N}_{0.2}$ and $\text{Cr}_{0.4}\text{N}_{0.26}\text{O}_{0.3}$ with thicknesses of 22, 37 and 8 nm, respectively. Longitudinal cross section foil prepared at a slight inclination to the surface of the photomask made it possible to form sections of all layers with dimensions sufficient for their study by electron microdiffraction. The performed phase analysis has confirmed the amorphous structure of the substrate and the $\text{Mo}_{0.06}\text{Si}_{0.31}\text{N}_{0.63}$ layer, and also has shown that the polycrystalline $\text{Cr}_{0.56}\text{N}_{0.44}$, $\text{Cr}_{0.74}\text{C}_{0.06}\text{N}_{0.2}$ and $\text{Cr}_{0.4}\text{N}_{0.26}\text{O}_{0.3}$ layers are formed by crystallites with a cubic lattice and parameters 3.92, 4.18 and 4.12 Å, respectively.

Keywords: nanostructures, transmission electron microscopy, electron microdiffraction, focused ion beam

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state task (Agreement FSMR-2023-0014) and using the equipment of the CCP “Diagnostics and modification of microstructures and nanoobjects”.

For citation: Volkov R. L., Borgardt N. I. Multilayered nanoscale heterocompositions structure study using transmission electron microscopy. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 711–726. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-711-726>. – EDN: QGSIPY.

Введение. Разработка и исследование различных многослойных гетерокомпозиций, состоящих из слоев наноразмерной толщины, представляют интерес для многих научно-технических приложений. Подобные гетерокомпозиции применяют в оптике для создания светофильтров [1], просветляющих покрытий [2], фотонных кристаллов [3], в химии в качестве датчиков газов [4], электрохимических катализаторов [5], в микроэлектронике в солнечных элементах различной конструкции [6], в устройствах на основе гетероструктур [7], в перепрограммируемой сегнетоэлектрической [8] и магниторезистивной [9] памяти, в интегральных микросхемах [10] и фотошаблонах [11].

Исследование строения многослойных гетерокомпозиций как на этапах разработки, так и при контроле технологического процесса их формирования выполняют с применением ряда современных методов. Кристаллическую структуру идентифицируют методами рентгеновской [12] или электронной [13] дифракции на отражение, химический состав определяют с применением вторичной ионной масс-спектропии [14], оже-спектропии [15] или рентгеновского энергодисперсионного микроанализа [16], толщину слоев и рельеф поверхности измеряют с помощью растровой электронной [16] и атомно-силовой [17] микроскопии.

Наиболее информативным методом, позволяющим всесторонне изучать многослойные гетерокомпозиции с разрешением вплоть до атомарного уровня, является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) [18]. Измерение толщины наноразмерных слоев, характеризацию границ раздела между ними и их химический микроанализ выполняют методами ПЭМ на приготовленных образцах тонкой фольги поперечного сечения толщиной несколько десятков нанометров. Анализ кристаллической структуры, как правило, осуществляют с использованием высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ), непосредственно визуализирующей атомную решетку, или дифракции сходящегося под малым углом пучка электронов с наноразмерным поперечным сечением (нано-дифракция) в области его прохождения через исследуемый образец. Данные методы имеют ограничения разрешающей способности [18], не позволяют эффективно исследовать аморфные материалы и требуют анализа множества локальных участков в случае образцов, состоящих из отдельных кристаллитов. Возможности применения классической электронной дифракции (микродифракции) [18] от выделяемого селективной диафрагмой участка образца размером от десятых долей до нескольких микрон могут быть ограничены из-за усреднения сигнала от нескольких наноразмерных слоев вследствие их небольшой толщины.

В настоящей работе методы ПЭМ применяются для идентификации структуры и определения состава наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций с использованием образцов поперечного и наклонного планарного сечений. Объектом исследований являются кристаллические и аморфные слои фазосдвигающего фотошаблона, используемого в современной микроэлектронике для выполнения литографии на длине волны 248 нм.

Для исследования электронно-микроскопических образцов (тонкой фольги) методом *in situ lift-out* [19] применяли электронно-ионный микроскоп Helios NanoLab 650 (Нидерланды), оснащенный газовым инжектором для локального осаждения платины и микроманипулятором Kleindick ММ3А-ЕМ. Для получения изображений тонкой фольги, картин микродифракции электронов и карт элементного состава использовали про-

свечивающий электронный микроскоп Titan Themis 200 (Нидерланды), оснащенный трехконденсорной системой освещения, корректором aberrаций объективной системы линз, камерой Ceta-16M, энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения Super-X и кольцевым детектором электронов, рассеянных на большие углы.

Приготовление электронно-микроскопических образцов. Получение электронно-микроскопических изображений, определение толщин и состава слоев, образующих многослойную гетерокомпозицию, выполняли на тонкой фольге поперечного сечения размером 10×3 мкм методом фокусированного ионного пучка (ФИП) стандартным способом [19]. Фольгу закрепляли на специальной предметной сетке. На финальных этапах методом ФИП при ускоряющем напряжении 2 кВ на ней формировали две области, имеющие разную толщину. Первую область толщиной 100–200 нм использовали для получения карты элементного состава, вторую область толщиной 10–20 нм – для получения электронно-микроскопических изображений нанослоев с атомарным разрешением и проведения количественного анализа их состава.

Прецизионный анализ структуры материалов, образующих слои фотошаблона, выполняли в просвечивающем электронном микроскопе методом микродифракции электронов в тонкой фольге планарного сечения. Ее приготовление почти полностью осуществляли согласно стандартной процедуре [20]. На поверхность фотошаблона методом ФИП локально осаждали защитный слой, состоящий из платины (Pt) и аморфного углерода (*a*-C), из приповерхностного материала формировалась заготовка, содержащая исследуемые слои, с латеральными размерами 5×15 мкм и толщиной несколько микрон. Затем ее крепили к игле микроманипулятора, вынимали с его помощью из фотошаблона, ориентировали так, чтобы ионный пучок был направлен параллельно слоям гетерокомпозиции, и крепили к предметной сетке с двух сторон внутри предварительно приготовленного методом ФИП углубления.

Дальнейшая процедура отличалась от стандартной и заключалась в следующем. Заготовку, схема сечения и расположения слоев внутри которой показана на рис. 1, *а*, разворачивали на 2° так, чтобы при распылении (травлении) ионным пучком получаемое сечение пересекало защитное покрытие (Pt + *a*-C), исследуемые слои и материал подложки (рис. 1, *б*), но при этом было максимально параллельным им. Заданный угол разворота (2°) при финальной толщине тонкой фольги 10 нм и применении селективной апертуры микроскопа диаметром 40 мкм при дальнейшем исследовании позволил получать картины микродифракции электронов от планарных сечений отдельных слоев, имеющих исходные толщины более 31 нм. Указанное значение толщины слоев, от которых могут быть получены дифракционные картины (электронограммы), превышает размеры некоторых тонких слоев (см. рис. 2, *а*). Поэтому на соответствующие электронограммы могут также накладываться дифракционные картины от соседних слоев, что необходимо учитывать при их анализе.

На следующем этапе тонкую фольгу утоняли с обеих сторон при энергии ионов галлия 30 кэВ до толщины 100–150 нм (рис. 1, *в*). После этого для уменьшения толщины аморфизованных слоев, образовавшихся на поверхности тонкой фольги при бомбардировке ионами, обе ее стороны распыляли при энергии ионов 5 кэВ в течение 20 с (рис. 1, *г*). Затем энергию ионов понижали до 2 кэВ, тонкую фольгу снизу со стороны подложки облучали ионами в течение 10 с, а со стороны защитного слоя Pt + *a*-C ее распыляли продолжительное время до тех пор, пока в локальных участках ее толщина не достигала значений менее 20 нм. Контроль утонения тонкой фольги осуществляли методом растровой электронной микроскопии при энергии электронов 2 кэВ в процессе ее распыления ионным пучком. Длительное травление одной из поверхностей тонкой

фольги, например верхнего слоя, приводит к неоднородному утонению ее латеральных участков, соответствующих слоям фотошаблона, которые формируются из различных материалов и поэтому имеют разные скорости распыления (см. рис. 1, *з*). Для устранения разнотолщинности тонкой фольги дополнительно выполняли локальное утонение соответствующих участков (рис. 1, *д*).

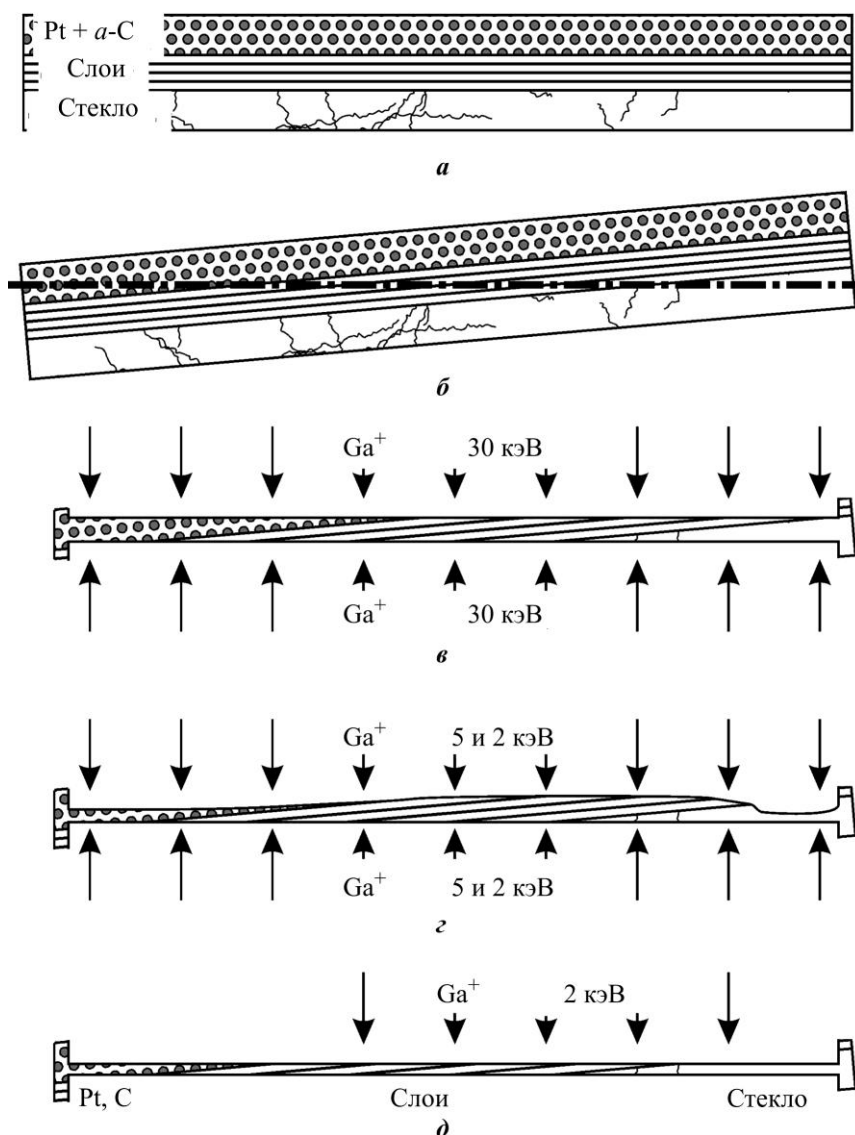


Рис. 1. Этапы финального утонения наклонной тонкой фольги планарного сечения: *а* – исходная схема расположения слоев; *б* – вращение тонкой фольги (плоскость сечения – штрихпунктирная линия – пересекает все слои); *в* – утонение методом ФИП обеих сторон тонкой фольги; *з* – кратковременное удаление аморфизованного слоя с нижней стороны и продолжительное утонение верхней стороны тонкой фольги; *д* – локальное устранение разнотолщинности толстых участков с верхней стороны тонкой фольги

Fig. 1. Inclined plan-view thin foil final thinning stages: *a* – original scheme of layers location; *b* – the thin foil rotation (section plane marked as dash-dotted line crosses all the layers); *c* – the thin foil both sides thinning using focused ion beam; *d* – amorphous layer short-term removal from the bottom side and long-term thinning the top side of the thin foil; *e* – thick regions thickness variation local removal from the bottom side of the thin foil

Исследование тонкой фольги поперечного сечения. ПРЭМ-изображение тонкой фольги поперечного сечения исследуемого фотошаблона и профили распределения атомов элементов, полученные методом рентгеновского микроанализа, показаны на рис. 2. Фотошаблон содержит наноразмерные слои $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$, $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$, $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ и $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$, выращенные на поверхности стеклянной подложки SiO_2 . Защитный слой на поверхности тонкой фольги, состоящий из $\text{Pt} + a\text{-C}$, осажден в процессе ее приготовления посредством ФИП.

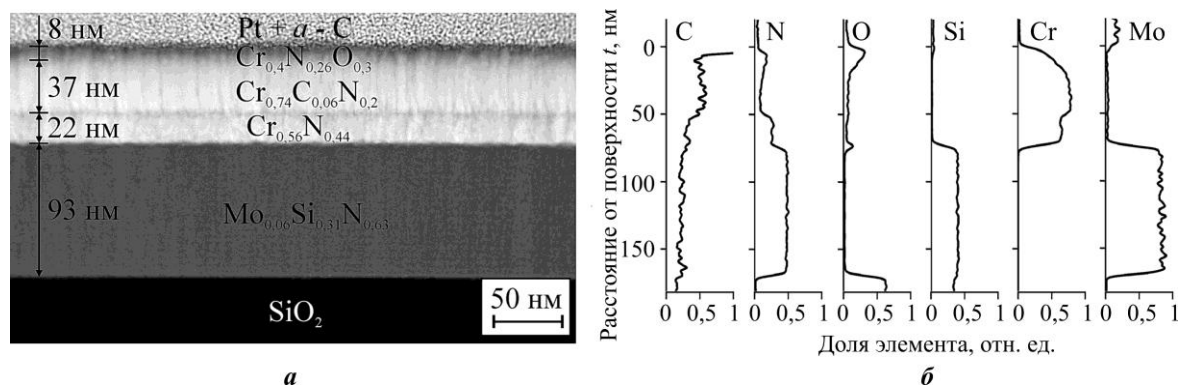


Рис. 2. ПРЭМ-изображение (а) и графики распределения элементного состава (б) тонкой фольги поперечного сечения фотошаблона

Fig. 2. STEM image (a) and chemical composition distribution graphs (b) within the cross-sectional thin foil of the photomask

На рис. 3 показаны ВРЭМ-изображения слоев фотошаблона и соответствующие им фурье-образы, позволяющие оценить упорядоченность атомных расположений. Из анализа рис. 3 следует, что подложка SiO_2 (рис. 3, а) и расположенный на ее поверхности слой $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$ (рис. 3, б) являются аморфными материалами, а слои $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ (рис. 3, в), $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (рис. 3, г) и $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (рис. 3, д) состоят из поликристаллов с разным размером кристаллитов и разной степенью разупорядоченности атомов в кристаллической решетке. Из рис. 3, в и д, на которых выделены примерные границы зерен, видно, что кристаллиты в слое $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ имеют большие размеры, чем в слое $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$. В слое $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (см. рис. 3, г) отдельные кристаллиты не выделяются, поскольку они имеют гораздо меньшие размеры, чем толщина приготовленной тонкой фольги, и поэтому их изображения накладываются друг на друга.

Фурье-образы кристаллических слоев фотошаблона отличаются друг от друга, прежде всего, плотностью расположения на них отдельных максимумов (пиков) интенсивности, возникающих при наличии на соответствующем изображении упорядоченных осцилляций интенсивности. Наименьшее количество пиков наблюдается на фурье-образе слоя $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (см. рис. 3, д), что свидетельствует о наличии на исходном ВРЭМ-изображении нескольких кристаллитов, ориентированных атомными колонками вдоль направления пучка электронов. На фурье-образе слоя $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ (см. рис. 3, в) пики выстраиваются вдоль окружности, но хорошо заметны. Следовательно, на соответствующем ВРЭМ-изображении визуализируется больше кристаллитов. На фурье-образе слоя $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (см. рис. 3, г) пиков интенсивности настолько много, что они неразличимы и слиты в единое кольцо. Следовательно, на исходном ВРЭМ-изображении видно большое количество разориентированных кристаллитов. Таким образом, поскольку все показанные на рис. 3 микрофотографии имеют один масштаб и размер, средние размеры кристаллитов увеличиваются в ряду $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$, $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$, $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$.

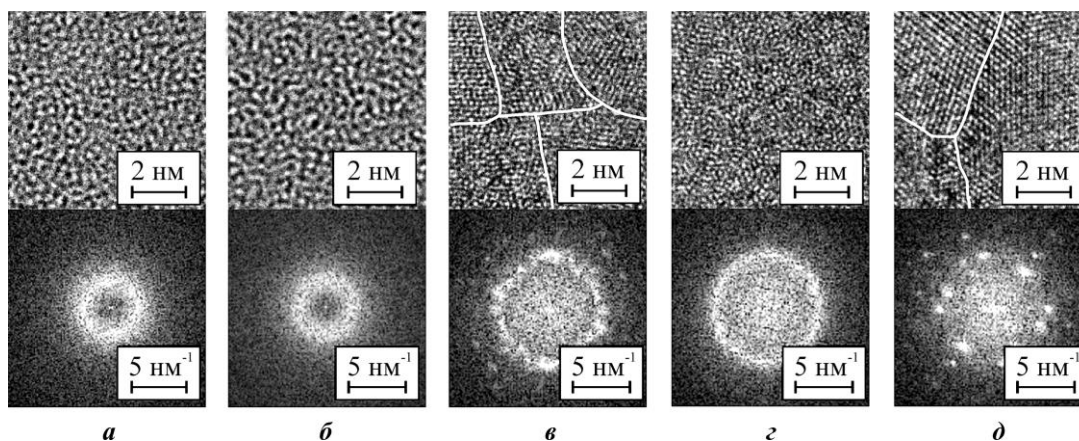


Рис. 3. ВРЭМ-изображения и фурье-образы слоев SiO_2 (а), $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$ (б), $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ (в), $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (г) и $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (д) тонкой фольги поперечного сечения фотошаблона (белые линии – примерные границы кристаллитов)

Fig. 3. HREM and Fourier images of SiO_2 (a), $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$ (b), $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ (c), $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (d) and $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (e) layers in the cross-sectional thin foil of the photomask (the white lines – rough boundaries of crystallites)

Диаметры колец и расстояния между диаметрально расположенными пиками на фурье-образах ВРЭМ-изображений слоев SiO_2 ; $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$; $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$; $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$; $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ соответствуют расстояниям в прямом пространстве 0,32; 0,43; 0,23; 0,22; 0,24 нм. Для аморфных материалов перечисленные значения не совпадают с литературными данными [21–24] и, по-видимому, обусловлены передаточной функцией системы и корректора aberrаций объективных линз микроскопа. Периоды осцилляции интенсивности на изображениях кристаллических слоев $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$; $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$; $\text{Cr}_{0,24}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ оказались близкими к межплоскостным расстояниям $d_{111} = 0,24$ нм в CrN с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой [25].

Исследование тонкой фольги планарного сечения. На рис. 4, а показано ПРЭМ-изображение слоев тонкой фольги планарного сечения фотошаблона. Видно, что в процессе приготовления тонкая фольга несколько искривилась и, несмотря на выполненное локальное травление ионным пучком, в ней имеется некоторая разнотолщинность. Сохранение разнотолщинности обусловлено, прежде всего, текучестью тонкого слоя стекла при бомбардировке ионами, в результате которой фольга изгибается в процессе распыления, а облучаемый участок смещается. Однако, поскольку финальные этапы приготовления тонкой фольги исключают модификацию одной из ее сторон, изначально представлявшей собой плоское сечение всех слоев фотошаблона (см. рис. 1, г, д), наличие локальных и достаточно утоненных участков во всех слоях позволяет выполнить их электронно-микроскопические исследования.

Определение местоположений участков на тонкой фольге, подходящих для исследования методом микродифракции электронов и содержащих те или иные слои исследуемой структуры, выполнено по дополнительно полученным и проанализированным картам распределения элементного состава, поскольку на ПРЭМ-изображении (см. рис. 4, а) слои слабо отличаются друг от друга. Для последующего получения дифракционных картин выбирали наиболее тонкие участки, элементный состав которых совпадает с данными исследования тонкой фольги поперечного сечения (см. рис. 2). Свидетельствующие об этом энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения показаны на рис. 4, б. Спектры, полученные от наиболее тонких слоев $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ и $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$, содержат относительно низкие пики элементов, входящих в состав соседних слоев. Следовательно, в соответствующие картины микродифракции электронов они будут вносить незначительный вклад.

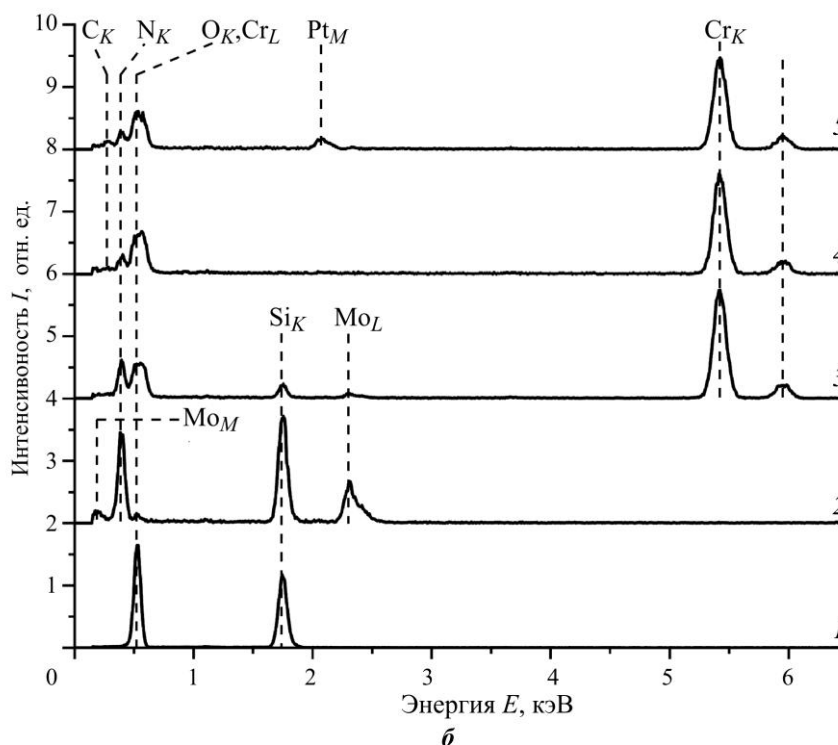
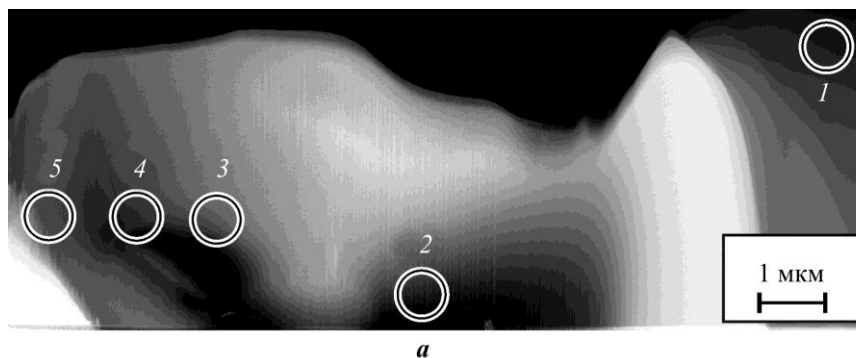


Рис. 4. ПРЭМ-изображение (а) и энергодисперсионные спектры рентгеновского излучения (б) слоев тонкой фольги наклонного планарного сечения фотошаблона: 1 – SiO_2 ; 2 – $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$; 3 – $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$; 4 – $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$; 5 – $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$; окружности – области регистрации спектров (интенсивности I спектров умножены на коэффициенты 0,25, 1,4, 0,8, 1,6 и 1 соответственно и смещены друг относительно друга по оси ординат на две единицы)

Fig. 4. STEM image (a) and energy dispersive X-ray spectrums (b) of the inclined planview thin layers foil of the photomask (the circles – corresponding spectrums registration regions): 1 – SiO_2 ; 2 – $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$; 3 – $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$; 4 – $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$; 5 – $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (intensities I of the spectrums are multiplied by 0.25, 1.4, 0.8, 1.6 and 1 coefficients respectively and shifted along the ordinate relative to each other by 2)

На рис. 5 в качестве примера показаны ПРЭМ- и ВРЭМ-изображения для слоя $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ тонкой фольги планарного сечения. Их сопоставление с ВРЭМ-изображением поперечного сечения этого слоя (см. рис. 3, в) позволяет заключить, что слой $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ состоит из столбчатых наноразмерных образований (наночастиц), ориентированных перпендикулярно поверхности подложки. Такая форма и ориентация наночастиц объясняет их резко очерченный вид на изображении, например частица А на рис. 5, а. Из этого рисунка видно, что для многих наночастиц характерна округлая форма. Границы

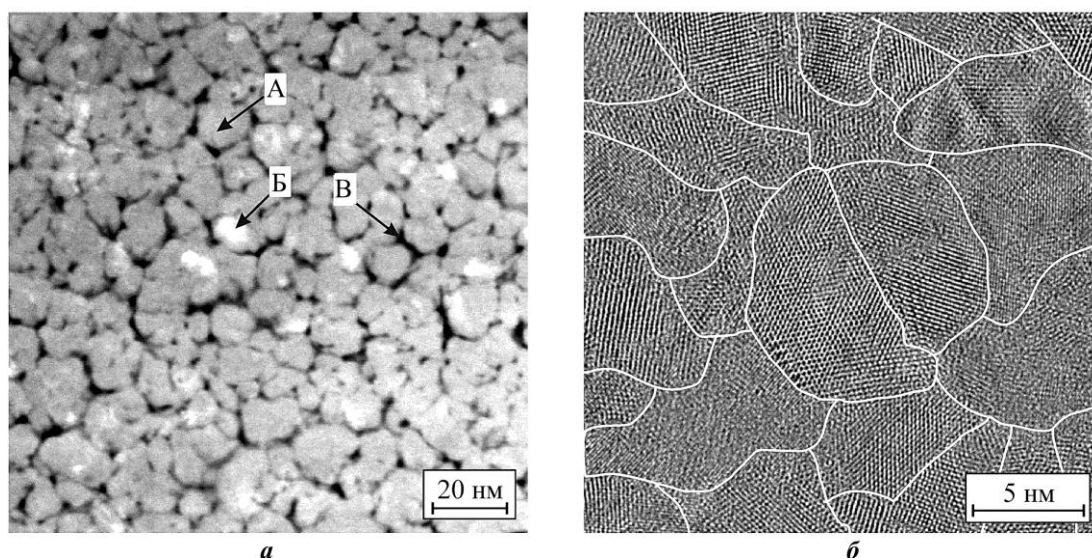


Рис. 5. ПРЭМ-изображение (а) и ВРЭМ-изображение (б) слоя $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ тонкой фольги наклонного планарного сечения фотошаблона: А – наночастицы; Б – кристаллиты, находящиеся в отражающей электроны ориентации; В – полости между наночастицами; белые линии – примерные границы кристаллитов

Fig. 5. STEM image (a) and HREM image (b) of the $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ layer in the inclined plan-view thin foil of the photomask: A – nanoparticles; B – crystallites oriented into reflection condition; C – the voids between particles; the white lines – rough boundaries of crystallites

между ними на ПРЭМ-микрофотографии, например область В, имеют пониженную интенсивность и, по-видимому, представляют собой полости. Латеральные размеры (диаметры) наночастиц составляют около 10–12 нм, а вертикальные – совпадают с толщиной слоя, равной 22 нм (см. рис. 2, а).

Участки тонкой фольги планарного сечения, имеющие на ПРЭМ-изображении повышенную интенсивность вследствие эффекта каналирования электронного пучка, например область Б на рис. 5, а, соответствуют кристаллитам, ориентированным атомными колонками параллельно пучку электронов. Они занимают только часть сечений наночастиц, образующих слой $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$. Следовательно, наблюдаемые наночастицы не являются монокристаллическими, а состоят из нескольких кристаллитов, что находится в соответствии с изображением поперечного сечения слоя на рис. 3, в. Атомарная структура и приблизительные границы таких кристаллитов показаны на рис. 5, б.

Микродифракция электронов от тонкой фольги планарного сечения. Для анализа структуры выявленных кристаллических и аморфных слоев использовали наряду с ВРЭМ метод микродифракции электронов. Он позволил получить интегральные данные об упорядоченности материала в таких слоях от участков с латеральными размерами 600 нм. Картины микродифракции получали в условиях выключения следующих элементов корректора aberrаций объективных линз электронного микроскопа: гексаполей, некоторых линз и дефлекторов. С одной стороны, такой режим работы является причиной некоторой делокализации получения электронограмм, к которым добавляется интерференция электронов, рассеянных материалом тонкой фольги за границами селективной апертуры на небольшом удалении от нее [18]. С другой стороны, режим позволяет устранить существенное и непредсказуемое искажение дифракционной картины гексаполями корректора. Сохраняющуюся при этом эллиптическую дисторсию устраняли при цифровой обработке электронограмм.

Электроннограммы формировались при плоскопараллельном освещении электронами тонкой фольги и введенной в колонну микроскопа селективной апертуры диаметром 40 мкм, которая пропускает электроны, рассеянные от участков тонкой фольги диаметрами 600 нм (см. рис. 4, а). Высокое отношение сигнал / шум достигалось за счет длительной экспозиции (40 с) дифракционной картины для каждого слоя. В течение всей процедуры их регистрации токи в линзах микроскопа и эуцентрическое положение тонкой фольги на оси колонны не меняли. Периодически переключали режимы проекционной системы между визуализацией изображения тонкой фольги для выбора исследуемого участка и получением дифракционной картины.

При неизменности настроек микроскопа исследуемая тонкая фольга была заменена на эталон NiO_x с известными расстояниями между атомными плоскостями [26]. После выставления в эуцентрическое положение на оси колонны для него при полностью аналогичных условиях получена эталонная дифракционная картина. Анализ дифракционной картины с использованием дополнений DiffTools [27] и EFAAnalysis [28] к программному обеспечению DigitalMicrograph [29] позволил установить параметры эллиптической дисторсии и исправить ее для всех полученных электроннограмм. Длина камеры микроскопа и масштабный коэффициент дифракционных картин определены согласно документации эталона NiO_x с применением компьютерных программ FIT2D [30] и Fityk [31]. Программа FIT2D позволила получить интегральные радиальные профили распределения интенсивности на электроннограммах, с помощью Fityk выполнена аппроксимация профилей отражений функциями псевдо-Войта и определены их позиции.

Центральные участки полученных после исправления эллиптической дисторсии и откалиброванных электроннограмм всех слоев в фотошаблоне показаны на рис. 6. Положение дифракционных колец на них совпадает с позициями максимумов интенсивности на фурье-образах ВРЭМ-изображений соответствующих слоев (см. рис. 3), гало на электроннограммах по сравнению с соответствующими фурье-образами микрофотографий имеют реалистичный вид, так как не искажаются передаточной функцией объективных линз микроскопа.

Электроннограммы, полученные от слоев $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ (рис. 6, в) и $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (рис. 6, д), имеют вид узких концентрических колец и указывают на похожую поликристаллическую структуру этих слоев. Отражения от слоя $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (рис. 6, з) удалены от центра электроннограммы практически на такие же расстояния, однако некоторые из них отсутствуют. Это означает, что материалы данного и соседних слоев имеют близкие параметры кристаллической решетки, но расположение атомов внутри нее несколько отличается. Также видно, что ширина колец относительно велика. Следовательно, данный материал представляет собой дефектный поликристалл, состоящий из зерен, размеры которых в несколько раз больше параметра кристаллической решетки. Дифракционные картины подложки SiO_2 (рис. 6, а) и слоя $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$ (рис. 6, б) имеют вид концентрических гало разного диаметра, что свидетельствует об аморфности указанных материалов и о различии расстояний между ближайшими атомами.

На рис. 7 приведены радиальные профили интегральной интенсивности, полученные с использованием программы FIT2D, от электроннограмм, которые показаны на рис. 6. Для наглядности вместо исходных интенсивностей I приведены распределения \sqrt{I} , смещенные друг относительно друга по оси ординат на 10 единиц для удобного расположения графиков и сравнения их друг с другом. Позиции максимумов пиков на профилях интенсивности аморфного слоя и подложки определяли путем их аппроксимации в программе Fityk [31] функциями Гаусса, хорошо подходящими для описания широких пиков.

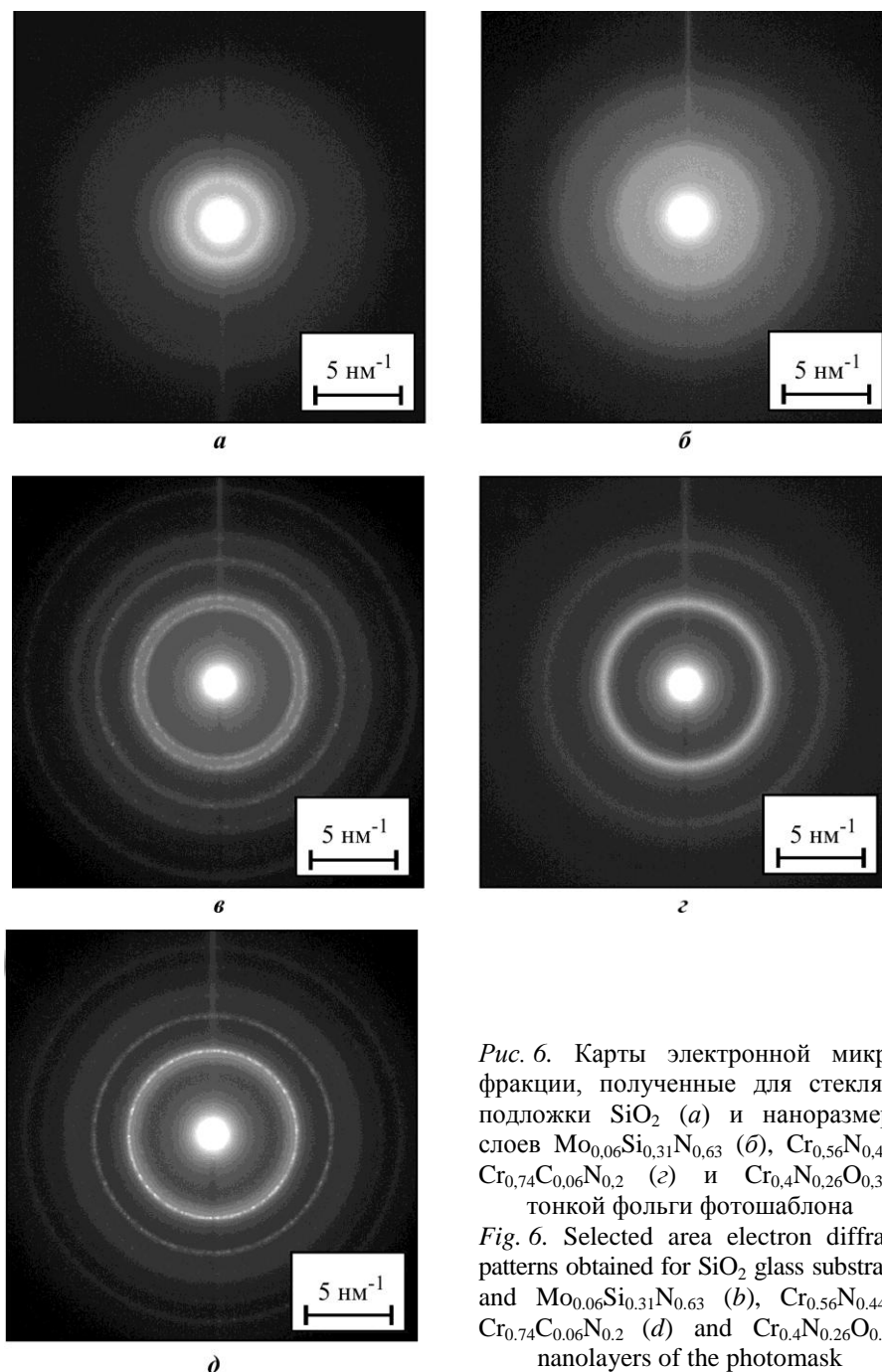


Рис. 6. Карты электронной микродифракции, полученные для стеклянной подложки SiO₂ (а) и наноразмерных слоев Mo_{0,06}Si_{0,31}N_{0,63} (б), Cr_{0,56}N_{0,44} (в), Cr_{0,74}C_{0,06}N_{0,2} (г) и Cr_{0,4}N_{0,26}O_{0,3} (д) тонкой фольги фотошаблона

Fig. 6. Selected area electron diffraction patterns obtained for SiO₂ glass substrate (a) and Mo_{0,06}Si_{0,31}N_{0,63} (b), Cr_{0,56}N_{0,44} (c), Cr_{0,74}C_{0,06}N_{0,2} (d) and Cr_{0,4}N_{0,26}O_{0,3} (e) nanolayers of the photomask

В подложке SiO₂ наиболее интенсивные пики располагаются в позициях 2,44 и 8,24 nm⁻¹, соответствующих расстояниям в прямом пространстве 0,4098 и 0,1213 нм. Выявленное положение колец хорошо совпадает с литературными данными [21]. Профиль интенсивности электронограммы слоя Mo_{0,06}Si_{0,31}N_{0,63} содержит основные пики 3,52 и 7,1 nm⁻¹, соответствующие расстояниям в прямом пространстве 0,3125 и 0,1408 нм. Они располагаются близко к положению некоторых диффузных пиков в аморфных соединениях SiN_x [22], MoN_x [23] и MoSi_xN_y [24]. Пики слоя Cr_{0,74}C_{0,06}N_{0,2} являются относительно широкими, и их позиции несколько отличаются от местоположения более узких отражений соседних поликристаллических слоев Cr_{0,56}N_{0,44} и Cr_{0,4}N_{0,26}O_{0,3}.

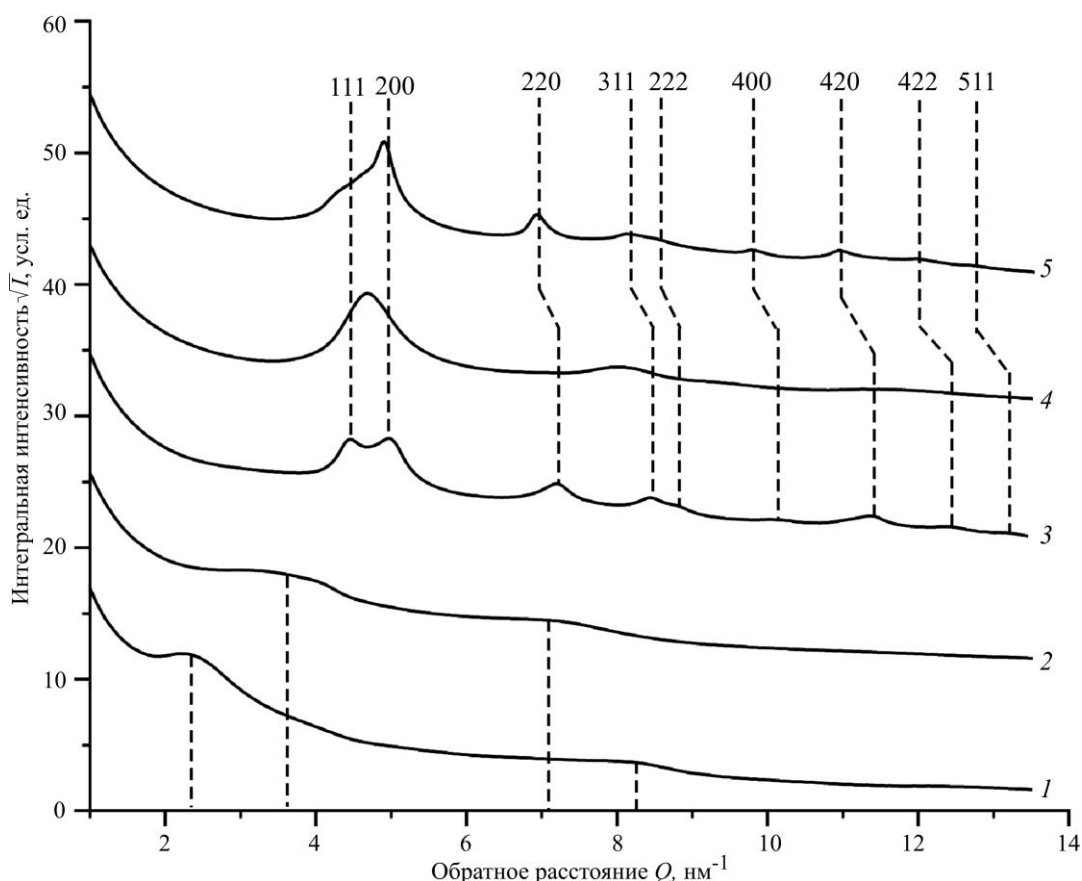


Рис. 7. Радиальные профили квадратного корня из интегральной интенсивности от электронограмм подложки SiO_2 (1) и наноразмерных слоев $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$ (2), $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ (3), $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (4) и $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (5) тонкой фольги фотошаблона (обратное расстояние Q измеряется от центра электронограмм; штриховые линии – позиции пиков и отражений на профилях с индексами Миллера для кубической кристаллической решетки)

Fig. 7. Integral intensity square root radial profiles of the diffraction patterns obtained for SiO_2 (1) substrate and $\text{Mo}_{0,06}\text{Si}_{0,31}\text{N}_{0,63}$ (2), $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$ (3), $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ (4) and $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ (5) nanolayers of the photomask (Q – reciprocal distance measured from centres of diffraction patterns; the dashed vertical lines are peaks and reflection positions on the profiles with Miller indexes shown for cubic crystal lattices)

Для электронографического анализа профили радиальной интенсивности дифракционных картин слоев $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$, $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$ и $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ аппроксимировали с применением модели поликристаллического соединения CrN с кубической решеткой в программном пакете Maud [32]. При аппроксимации варьировали средний размер кристаллитов и параметр кристаллической решетки, а интенсивности отражений изменяли независимо друг от друга для учета эффекта двойной дифракции электронов и структурных факторов рассеяния, которые различаются вследствие разного состава слоев. В результате выполненной аппроксимации установлено, что кристаллическая решетка слоев $\text{Cr}_{0,56}\text{N}_{0,44}$; $\text{Cr}_{0,74}\text{C}_{0,06}\text{N}_{0,2}$; $\text{Cr}_{0,4}\text{N}_{0,26}\text{O}_{0,3}$ имеет параметры 3,92; 4,18; 4,12 Å соответственно, а в предположении о совершенстве кристаллической структуры кристаллитов их размеры равны 3,2; 1,5; 4,8 нм, что коррелирует с данными, полученными в результате анализа ВРЭМ-изображений этих слоев.

Закключение. Исследования на примере фазосдвигающего фотошаблона, используемого в операциях литографии в микроэлектронике, показали, что применение методов ФИП, ПЭМ и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа для изучения структуры, измерения толщины и определения состава слоев наноразмерной толщины является эффективным.

Литература

1. **Kitui M., Mwamburi M. M., Gaitho F., Maghanga C. M.** Optical properties of TiO₂ based multilayer thin films: Application to optical filters // *Int. J. Thin Film Sci. Technol.* 2015. Vol. 4. Iss. 1. P. 17–21.
2. SiO_yN_x/SiN_x stack anti-reflection coating with PID-resistance for crystalline silicon solar cells / **C. Zhou, J. Zhu, S. E. Foss et al.** // *Energy Procedia.* 2015. Vol. 77. P. 434–439. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.061>
3. Near-perfect selective photonic crystal emitter with nanoscale layers for daytime radiative cooling / **K. Yao, H. Ma, M. Huang et al.** // *ACS Appl. Nano Mater.* 2019. Vol. 2. No. 9. P. 5512–5519. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01097>
4. TiO₂/Cu₂O/CuO multi-nanolayers as sensors for H₂ and volatile organic compounds: An experimental and theoretical investigation / **O. Lupan, D. Santos-Carballal, N. Ababii et al.** // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2021. Vol. 13. Iss. 27. P. 32363–32380. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c04379>
5. Controlling crystal orientation in multilayered heterostructures toward high electro-catalytic activity for oxygen reduction reaction / **Y. Zheng, Y. Li, T. Wu et al.** // *Nano Energy.* 2019. Vol. 62. P. 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.069>
6. Suppression of SnS₂ secondary phase on Cu₂ZnSnS₄ solar cells using multi-metallic stacked nanolayers / **F.-I. Lai, J.-F. Yang, J.-E. Li et al.** // *Nanomaterials.* 2023. Vol. 13. Iss. 3. Art. No. 432. <https://doi.org/10.3390/nano13030432>
7. Исследование структуры и состава напряженного эпитаксиального слоя в гетерокомпозиции InAlAs/GaAs (100) методами просвечивающей электронной микроскопии / **М. В. Ловыгин, Н. И. Боргардт, А. С. Бугаев и др.** // *Изв. вузов. Электроника.* 2015. Т. 20. № 4. С. 431–439. EDN: UDUYXT.
8. Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования / **Д. А. Абдуллаев, Р. А. Милованов, Р. Л. Волков и др.** // *Российский технологический журнал.* 2020. Т. 8. № 5 (37). С. 44–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>. – EDN: PHRTOP.
9. **Shubham K., Gupta A.** *Integrated circuit fabrication.* Abingdon; Boca Raton, FL: CRC Press, 2021. 352 p.
10. *Handbook of photomask manufacturing technology* / ed. **S. Rizvi.** Boca Raton, FL: CRC Press, 2005. 728 p.
11. Mo/Si lamellar multilayer gratings with high efficiency and enhanced resolution for the X-ray region of 1000–1700 eV / **Y. Feng, Q. Huang, Y. Zhuang et al.** // *Optics Express.* 2021. Vol. 29. Iss. 9. P. 13416–13427. <https://doi.org/10.1364/OE.422483>
12. Determination of the layered structure in Mo/Si multilayers by grazing incidence X-ray reflectometry / **A. E. Yakshin, E. Louis, P. C. Görts et al.** // *Phys. B: Condens. Matter.* 2000. Vol. 283. Iss. 1–3. P. 143–148. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(99\)01909-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01909-2)
13. **Braun W.** *Applied RHEED: reflection high-energy electron diffraction during crystal growth.* Berlin; Heidelberg: Springer, 1999. IX, 220 p. <https://doi.org/10.1007/BFb0109548>
14. ToF-SIMS: materials analysis by mass spectrometry / eds **J. C. Vickerman, D. Briggs.** Chichester: IM Publications; Manchester: SurfaceSpectra, 2013. 732 p.
15. **Chang C. C.** Auger electron spectroscopy // *Surf. Sci.* 1971. Vol. 25. Iss. 1. P. 53–79.
16. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* / **J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael et al.** 4th ed. New York: Springer, 2017. XXIII, 550 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
17. **Magonov S. N., Whangbo M.-H.** *Surface analysis with STM and AFM: Experimental and theoretical aspects of image analysis.* Weinheim; New York; Basel: VCH, 1996. 335 p. <https://doi.org/10.1002/9783527615117>
18. *Transmission electron microscopy: Diffraction, imaging, and spectrometry* / eds **C. B. Carter, D. B. Williams.** Cham: Springer, 2016. XXXIII, 518 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26651-0>
19. *Introduction to focused ion beams: Instrumentation, theory, techniques and practice* / eds **L. A. Giannuzzi, F. A. Stevie.** New York: Springer, 2004. XVII, 357 p. <https://doi.org/10.1007/b101190>

20. Electron microscopy studies of crystallites in carbon nanopillars grown by low-temperature plasma-enhanced chemical-vapor deposition / *Y. S. Grishina, N. I. Borgardt, R. L. Volkov et al.* // *J. Surf. Investig.* 2017. Vol. 11. P. 226–233. <https://doi.org/10.1134/S102745101701027X>
21. Onset temperatures and kinetics of quartz glass crystallization / *A. I. Nepomnyashchikh, A. A. Shalaev, T. Yu. Sizova et al.* // *Crystallogr. Rep.* 2018. Vol. 63. P. 290–294. <https://doi.org/10.1134/S1063774518020153>
22. Transmission electron microscopy study of silicon nitride amorphous films obtained by reactive pulsed laser deposition / *V. S. Teodorescu, L. C. Nistor, M. Popescu et al.* // *Thin Solid Films.* 2001. Vol. 397. Iss. 1-2. P. 12–16. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01408-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01408-0)
23. Characterisation of amorphous molybdenum silicide (MoSi) superconducting thin films and nanowires / *A. Banerjee, L. J. Baker, A. Doye et al.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2017. Vol. 30. No. 8. Art. No. 084010. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa76d8>
24. *Kattelus H., Ylönen M., Blomberg M.* Amorphous Mo–N and Mo–Si–N films in microelectromechanical systems // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures.* 2005. Vol. 28. Iss. 8. P. 743–749. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2005.00887.x>
25. *Blix R.* Röntgenanalyse des Chrom–Stickstoffsystems nebst einer orientierenden Konstitutionsuntersuchung des stickstoffhaltigen Ferrochroms // *Zeitschrift für Physikalische Chemie.* 1929. Bd. 3B. No. 1. S. 229–239. <https://doi.org/10.1515/zpch-1929-0317>
26. *Bennett J. C., Egerton R. F.* NiO test specimens for analytical electron microscopy: Round-robin results // *Microscopy and Microanalysis.* 1995. Vol. 1. Iss. 4. P. 143–149. <https://doi.org/10.1017/S1431927695111435>
27. *Mitchell D. R. G.* DiffTools: Electron diffraction software tools for DigitalMicrograph // *Microsc. Res. Tech.* 2008. Vol. 71. Iss. 8. P. 588–593. <https://doi.org/10.1002/jemt.20591>
28. *Mitchell D. R. G., Van den Berg J. A.* Development of an ellipse fitting method with which to analyse selected area electron diffraction patterns // *Ultramicroscopy.* 2016. Vol. 160. P. 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2015.10.009>
29. *Mitchell D. R. G., Schaffer B.* Scripting-customised microscopy tools for Digital Micrograph // *Ultramicroscopy.* 2005. Vol. 103. Iss. 4. P. 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2005.02.003>
30. *Hammersley A. P.* FIT2D: a multi-purpose data reduction, analysis and visualization program // *J. Appl. Cryst.* 2016. Vol. 49 (2). P. 646–652. <https://doi.org/10.1107/S1600576716000455>
31. *Wojdyr M.* Fityk: a general-purpose peak fitting program // *J. Appl. Cryst.* 2010. Vol. 43 (5). No. 1. P. 1126–1128. <https://doi.org/10.1107/S002188981003049927>
32. MAUD Rietveld refinement software for neutron diffraction texture studies of single- and dual-phase materials / *A. I. Saville, A. Creuziger, E. B. Mitchell et al.* // *Integr. Mater. Manuf. Innov.* 2021. Vol. 10. Iss. 3. P. 461–487. <https://doi.org/10.1007/s40192-021-00224-5>

Статья поступила в редакцию 05.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 28.09.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

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

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

References

1. Kitui M., Mwamburi M. M., Gaitho F., Maghanga C. M. Optical properties of TiO₂ based multilayer thin films: Application to optical filters. *Int. J. Thin Film Sci. Technol.*, 2015, vol. 4, iss. 1, pp. 17–21.
2. Zhou C., Zhu J., Foss S. E., Haug H., Nordseth Ø., Marstein E. S., Wang W. SiO_yN_x/SiN_x stack anti-reflection coating with PID-resistance for crystalline silicon solar cells. *Energy Procedia*, 2015, vol. 77, pp. 434–439. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.061>
3. Yao K., Ma H., Huang M., Zhao H., Zhao J., Li Y., Dou S., Zhan Y. Near-perfect selective photonic crystal emitter with nanoscale layers for daytime radiative cooling. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2019, vol. 2, no. 9, pp. 5512–5519. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01097>
4. Lupan O., Santos-Carballal D., Ababii N., Magariu N., Hansen S., Vahl A., Zimoch L., Hoppe M. et al. TiO₂/Cu₂O/CuO multi-nanolayers as sensors for H₂ and volatile organic compounds: An experimental and theoretical investigation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, vol. 13, iss. 27, pp. 32363–32380. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c04379>
5. Zheng Y., Li Y., Wu T., Zhao C., Zhang W., Zhu J., Li Zh., Chen J. et al. Controlling crystal orientation in multilayered heterostructures toward high electro-catalytic activity for oxygen reduction reaction. *Nano Energy*, 2019, vol. 62, pp. 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.069>
6. Lai F.-I., Yang J.-F., Li J.-E., Hsu Y.-C., Kuo S.-Y. Suppression of SnS₂ secondary phase on Cu₂ZnSnS₄ solar cells using multi-metallic stacked nanolayers. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, iss. 3, art. no. 432. <https://doi.org/10.3390/nano13030432>
7. Lovygin M. V., Borgardt N. I., Bugaev A. S., Volkov R. L., Seibt M. Study of the structure and composition of the strained epitaxial layer in the InAlAs/GaAs (100) heterostructure by transmission electron microscopy. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, iss. 13, pp. 1753–1758. <https://doi.org/10.1134/S1063782616130066>
8. Abdullaev D. A., Milovanov R. A., Volkov R. L., Borgardt N. I., Lantsev A. N., Vorotilov K. A., Sigov A. S. Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research. *Russian Technological Journal*, 2020, vol. 8, no. 5 (37), pp. 44–67. (In Russian). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>. – EDN: PHRTOP.
9. Shubham K., Gupta A. *Integrated circuit fabrication*. Abingdon, Boca Raton, FL, CRC Press, 2021. 352 p.
10. Rizvi S., ed. *Handbook of photomask manufacturing technology*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2005. 728 p.
11. Feng Y., Huang Q., Zhuang Y., Sokolov A., Lemke S., Qi R., Zhang Zh., Wang Zh. Mo/Si lamellar multilayer gratings with high efficiency and enhanced resolution for the X-ray region of 1000–1700 eV. *Optics Express*, 2021, vol. 29, iss. 9, pp. 13416–13427. <https://doi.org/10.1364/OE.422483>
12. Yakshin A. E., Louis E., Görts P. C., Maas E. L. G., Bijkerk F. Determination of the layered structure in Mo/Si multilayers by grazing incidence X-ray reflectometry. *Phys. B: Condens. Matter*, 2000, vol. 283, iss. 1–3, pp. 143–148. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(99\)01909-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01909-2)
13. Braun W. *Applied RHEED: reflection high-energy electron diffraction during crystal growth*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1999. ix, 220 p. <https://doi.org/10.1007/BFb0109548>
14. Vickerman J. C., Briggs D., eds. *ToF-SIMS: materials analysis by mass spectrometry*. Chichester, IM Publications, Manchester, SurfaceSpectra, 2013. 732 p.
15. Chang C. C. Auger electron spectroscopy. *Surf. Sci.*, 1971, vol. 25, iss. 1, pp. 53–79.
16. Goldstein J. I., Newbury D. E., Michael J. R., Ritchie N. W. M., Scott J. H. J., Joy D. C. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. 4th ed. New York, Springer, 2017. xxiii, 550 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
17. Magonov S. N., Whangbo M.-H. *Surface analysis with STM and AFM: Experimental and theoretical aspects of image analysis*. Weinheim, New York, Basel, VCH, 1996. 335 p. <https://doi.org/10.1002/9783527615117>
18. Carter C. B., Williams D. B., eds. *Transmission electron microscopy: Diffraction, imaging, and spectrometry*. Cham, Springer, 2016. xxxiii, 518 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26651-0>
19. Giannuzzi L. A., Stevie F. A. *Introduction to focused ion beams: Instrumentation, theory, techniques and practice*. New York, Springer, 2004. xvii, 357 p. <https://doi.org/10.1007/b101190>
20. Grishina Y. S., Borgardt N. I., Volkov R. L., Gromov D. G., Dubkov S. V. Electron microscopy studies of crystallites in carbon nanopillars grown by low-temperature plasma-enhanced chemical-vapor deposition. *J. Surf. Investig.*, 2017, vol. 11, pp. 226–233. <https://doi.org/10.1134/S102745101701027X>
21. Nepomnyashchikh A. I., Shalaev A. A., Sizova T. Yu., Paklin A. S., Sapozhnikov A. N., Pavlova L. A. Onset temperatures and kinetics of quartz glass crystallization. *Crystallogr. Rep.*, 2018, vol. 63, pp. 290–294. <https://doi.org/10.1134/S1063774518020153>

22. Teodorescu V. S., Nistor L. C., Popescu M., Mihailescu I. N., Gyorgy E., Van Landuyt J., Perrone A. Transmission electron microscopy study of silicon nitride amorphous films obtained by reactive pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 2001, vol. 397, iss. 1-2, pp. 12–16. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01408-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01408-0)
23. Banerjee A., Baker L. J., Doye A., Nord M., Heath R. M., Erotokritou K., Bosworth D., Barber Z. H. et al. Characterisation of amorphous molybdenum silicide (MoSi) superconducting thin films and nanowires. *Supercond. Sci. Technol.*, 2017, vol. 30, no. 8, art. no. 084010. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa76d8>
24. Kattelus H., Ylönen M., Blomberg M. Amorphous Mo–N and Mo–Si–N films in microelectromechanical systems. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005, vol. 28, iss. 8, pp. 743–749. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2005.00887.x>
25. Blix R. Röntgenanalyse des Chrom–Stickstoffsystems nebst einer orientierenden Konstitutionsuntersuchung des stickstoffhaltigen Ferrochroms. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1929, vol. 3B, no. 1, pp. 229–239. <https://doi.org/10.1515/zpch-1929-0317>
26. Bennett J. C., Egerton R. F. NiO test specimens for analytical electron microscopy: Round-robin results. *Microscopy and Microanalysis*, 1995, vol. 1, iss. 4, pp. 143–149. <https://doi.org/10.1017/S1431927695111435>
27. Mitchell D. R. G. DiffTools: Electron diffraction software tools for DigitalMicrograph. *Microsc. Res. Tech.*, 2008, vol. 71, iss. 8, pp. 588–593. <https://doi.org/10.1002/jemt.20591>
28. Mitchell D. R. G., Van den Berg J. A. Development of an ellipse fitting method with which to analyse selected area electron diffraction patterns. *Ultramicroscopy*, 2016, vol. 160, pp. 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2015.10.009>
29. Mitchell D. R. G., Schaffer B. Scripting-customised microscopy tools for Digital Micrograph. *Ultramicroscopy*, 2005, vol. 103, iss. 4, pp. 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2005.02.003>
30. Hammersley A. P. FIT2D: a multi-purpose data reduction, analysis and visualization program. *J. Appl. Cryst.*, 2016, vol. 49 (2), pp. 646–652. <https://doi.org/10.1107/S1600576716000455>
31. Wojdyr M. Fityk: a general-purpose peak fitting program. *J. Appl. Cryst.*, 2010, vol. 43 (5), no. 1, pp. 1126–1128. <https://doi.org/10.1107/S002188981003049927>
32. Saville A. I., Creuziger A., Mitchell E. B., Vogel S. C., Benzing J. T., Klemm-Toole J., Clarke K. D., Clarke A. J. MAUD Rietveld refinement software for neutron diffraction texture studies of single- and dual-phase materials. *Integr. Mater. Manuf. Innov.*, 2021, vol. 10, iss. 3, pp. 461–487. <https://doi.org/10.1007/s40192-021-00224-5>

The article was submitted 05.09.2023; approved after reviewing 28.09.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

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

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

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

Полные тексты статей журнала с 2004 по 2022 гг. доступны на сайтах
Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия
высших учебных заведений. Электроника»: <http://ivuz-e.ru>

Научная статья
УДК 666.112.4:544.72.05
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-6-727-733
EDN: XAFNUG

Резистивные свойства конструкционных стекол микроканальных пластин

О. Г. Ашхотов¹, И. Б. Ашхотова¹, Т. Т. Магкоев²

¹Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия

²Северо-Осетинский государственный университет
им. К. Л. Хетагурова, г. Владикавказ, Россия

oandi@rambler.ru

Аннотация. Создание резистивно-эмиссионного слоя в каналах микроканальных пластин происходит на этапе термохимической обработки в разбавленных кислотных и щелочных растворах. Варьируя режимы обработки, можно в той или иной мере менять параметры готового прибора. В работе для решения проблемы получения оптимальных электронно-оптических параметров микроканальных пластин исследованы резистивные характеристики свинцово-силикатных стекол после обработки в химических растворах. С использованием разработанной установки измерена электропроводность базовых стекол, одиночного канала, заготовок и прибора в целом. Показано, что рабочее электрическое сопротивление микроканальной пластины вследствие саморазогрева несколько меньше истинного. При температурах более 200 °С сопротивление микроканальной пластины меняется на несколько порядков вследствие ионной проводимости. Помимо измерения интегральных параметров измерено сопротивление одного канала, среднее значение которого равно $1 \cdot 10^{14}$ Ом. Установлено, что химическая обработка образцов влияет на высокотемпературную ионную проводимость, но при этом энергия активации электропроводности не меняется. Последнее, в свою очередь, свидетельствует о неизменности механизма проводимости и типа носителей заряда. Отмечено, что обработка стекол в растворах NaOH и HF способствует значительному изменению их электрического сопротивления.

Ключевые слова: свинцово-силикатные стекла, резистор, обработка, электропроводность, ионы, катионы, характеристики, поверхность

Финансирование работы: работа выполнена в рамках госзадания СОГУ FEFN-2021_0005.

Для цитирования: Ашхотов О. Г., Ашхотова И. Б., Магкоев Т. Т. Резистивные свойства конструкционных стекол микроканальных пластин // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 727–733. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-727-733>. – EDN: XAFNUG.

Original article

Resistive properties of structural glasses of microchannel plates

O. G. Ashkhotov¹, I. B. Ashkhotova¹, T. T. Magkoev²

¹Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia

²North Ossetian State University named after K. L. Khetagurov, Vladikavkaz, Russia

oandi@rambler.ru

Abstract. The formation of a resistive emission layer in channels of microchannel plates occurs at the stage of thermochemical treatment in dilute acid and alkaline solutions. By varying the processing modes, it is possible to adjust the parameters of the finished device to a greater or lesser extent. In this work, in order to solve the problem of forming optimal electron-optical parameters of microchannel plates the change in the resistive characteristics of lead silicate glasses after treatment in chemical solutions are investigated. Using developed installations the electrical conductivity of a single channel, workpieces and the device as a whole was measured. It is shown that the operating electrical resistance of the microchannel plate due to self-heating is somewhat less than the true one. At temperatures higher than 200 °C, the resistance of the microchannel plate changes by several digits due to ionic conductivity. In addition to integral parameters measurement, one channel resistance was measured, its average value is $1 \cdot 10^{14}$ Ohm. It has been established that the chemical treatment of structural glasses affects the high-temperature ionic conductivity but activation energy of electrical conductivity remains constant. The latter in its turn indicates the immutability of the conduction mechanism and the type of charge carriers. It is noted that the treatment of glasses in NaOH and HF solutions can significantly change their electrical resistance.

Keywords: lead silicate glasses, resistor, processing, electrical conductivity, ions, cations, characteristics, surface

Funding: the work was carried out within the framework of the state task FEFN-2021_0005 of the North Ossetian State University.

For citation: Ashkhotov O. G., Ashkhotova I. B., Magkoev T. T. Resistive properties of structural glasses of microchannel plates. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 727–733. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-727-733>. – EDN: XAFNUG.

Введение. Микроканальная пластина (МКП) производится из стекла и представляет собой сотовую структуру. Геометрические параметры приборов, частью которых являются МКП, могут различаться, но поликапиллярная структура с полыми каналами диаметром до 3 мкм не меняется [1]. МКП предназначена для умножения потока элект-

тронов, обусловленного явлением вторичной электронной эмиссии при взаимодействии первичных электронов с внутренними стенками каналов пластины. МКП применяются в электронно-оптических преобразователях, например в приборах ночного видения, а также в системах управления заряженными частицами [2], детектирования сверхслабых сигналов оптического излучения [3], усилителях яркости, быстродействующих электронно-лучевых трубках, масс-спектрографах [4] и пр. МКП характеризуются химико-физическими и электрофизическими параметрами, закладываемыми на этапе производства. Любое неконтролируемое изменение параметров (из-за отклонений в технологии или воздействия внутренних и внешних факторов) влечет за собой ухудшение рабочих характеристик МКП.

Конструкционными материалами МКП являются свинцово-силикатные стекла [5]. В процессе производства МКП стекла подвергаются различным физическим и химическим воздействиям. Например, при обработке в кислотных и щелочных растворах в стеклах происходят процессы, приводящие к изменению важных в практическом плане электрических и оптических параметров. В работах [6–9] имеется информация о некоторых электрофизических параметрах МКП: ВАХ, зависимостях электрического сопротивления МКП от приложенного напряжения, температуре и др.

В настоящей работе изучаются резистивные свойства свинцово-силикатных стекол, составляющих МКП. Рассматриваются электрические свойства стекол С87-2 с массовым содержанием, %: 40,2 SiO₂; 41,0 PbO; 7,0 Na₂O; 7,0 BaO; 3,5 Al₂O₃; 1,0 Bi₂O₃; 0,3 As₂O₃ и С78-4 с массовым содержанием, %: 36,8 SiO₂; 54,0 PbO; 3,0 BaO; 2,0 Al₂O₃; 1,0 Bi₂O₃; 1,7 K₂O; 0,5 Na₂O после воздействия используемыми в технологии производства МКП кислотным (0,05 н HF) и щелочным (1,39 н NaOH) растворами [2]. Изучаются одиночные каналы и МКП18-10 (18 мм – диаметр рабочей зоны, 10 мкм – диаметр канала), при изготовлении которых использовали указанные растворы. Образцы для исследований предоставлены производителем МКП – ВТЦ «Баспик» (г. Владикавказ).

Эксперимент. Исследования электрофизических свойств МКП и дисков свинцово-силикатных стекол после химических воздействий проводили на установке, состоящей из высоковакуумной камеры, в которую вмонтирована ячейка для измерения сопротивления образцов МКП или стекол [9]. Для получения температурных зависимостей ячейку размещали в печи, выполненной из кварцевой трубы с резистивным нагревом. Предельное разрежение $1 \cdot 10^{-3}$ Па обеспечивалось использованием форвакуумного и диффузионного насосов. Остаточное давление в рабочей камере в зависимости от его значения измеряли механическим, термпарным и ионизационным манометрами. Для защиты измерительной ячейки от паров вакуумных масел между диффузионным насосом и рабочей камерой устанавливали азотную ловушку.

Перед измерениями сопротивления МКП ячейку обезжиривали, далее контролировали токи утечки. Время измерения сопротивления определяли процессами стабилизации тока в цепи. Сопротивление единичных каналов измеряли в ячейке, состоящей из системы управления положением зонда, размер которого соизмерим с внутренним диаметром исследуемого канала МКП [9]. В качестве образцов использовали восстановленные в среде водорода вытравленные заготовки МКП с односторонним напылением для контакта с электродом.

Результаты и их обсуждение. В приборах ночного видения приложенное напряжение находится в пределах 700–1000 В [2]. При таком рабочем напряжении МКП разогревается, что приводит к росту проводимости и, как следствие, катастрофической ситуации. Сказанное подтверждается результатами измерения сопротивления МКП, полученными в высоковакуумных (10^{-3} Па) условиях. Температуру МКП измеряли при

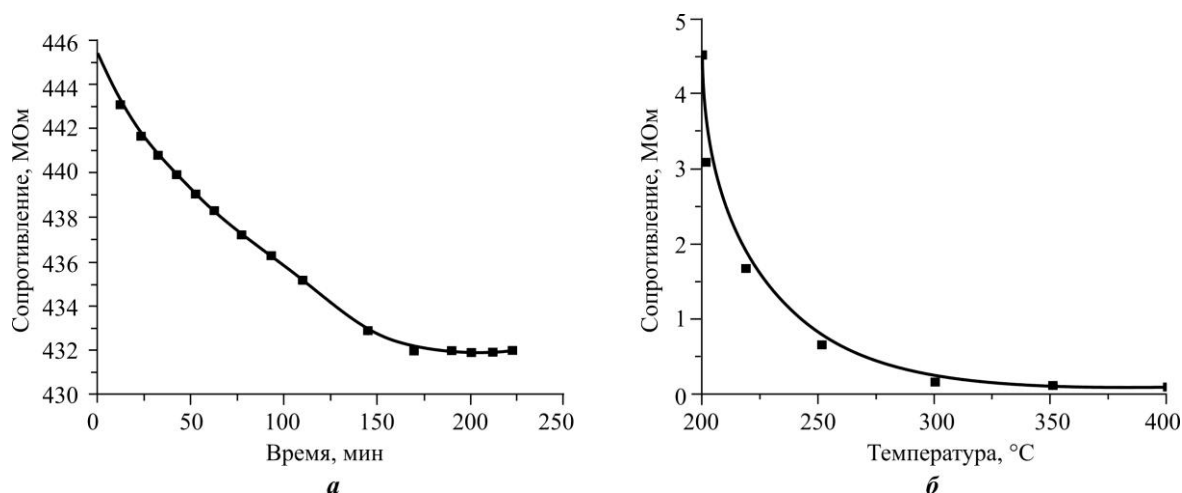


Рис. 1. Зависимости сопротивления МКП от времени при саморазогреве (а) и от температуры (б)
 Fig. 1. Dependences of microchannel plate resistance on time during self-heating (a) and on temperature (b)

напряжении 1000 В (рис. 1, а). Как видно из рис. 1, а, система приходит в равновесное состояние в течение 3 ч при остаточном давлении в рабочей камере $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Повышение температуры образцов (более 200 °С) снижает сопротивление МКП в сотни раз (рис. 1, б).

Исследование влияния внешних воздействий на резистивные свойства одного канала в составе заготовки МКП оказалось неудачным, так как наблюдалась сильная электрическая связь соседних каналов из-за большой объемной и поверхностной проводимости образцов. Наблюдалось также ярко выраженное различие в электрических параметрах пограничных и внутренних каналов в пределах одной микроканальной соты [10]. Эксперименты показали, что среднее значение сопротивления канала составляет $1 \cdot 10^{14}$ Ом. Для решения проблемы саморазогрева МКП в рабочем режиме проведен анализ высокотемпературной проводимости конструкционных свинцово-силикатных стекол МКП в зависимости от химической обработки. С этой целью исследовали диски

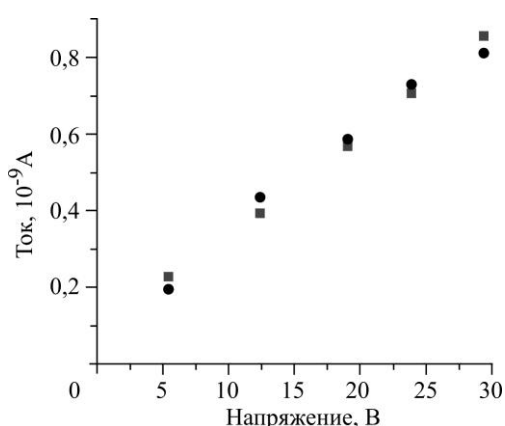


Рис. 2. ВАХ свинцово-силикатных стекол С87-2 (●) и С78-4 (■)
 Fig. 2. Volt-ampere characteristic of lead silicate glasses С87-2 (●) and С78-4 (■)

стекло С87-2 и С78-4 после обработки в течение 30 мин при комнатной температуре в 0,05 н растворе HF и в 1,39 н растворе NaOH [8]. Полученные ВАХ представлены на рис. 2. Как видно, ВАХ стекол практически совпадают. Различие начинает проявляться при температурах от 200–250 °С и выше.

На рис. 3 продемонстрированы температурные зависимости сопротивления дисков свинцово-силикатных стекол С87-2 и С78-4. Оба раствора – кислотный и щелочной – повышают проводимость стекол, но NaOH влияет на сопротивление сильнее. По полученным данным построены политермы изменения электропроводности $\ln(1/R)$ в зависимости от обратной температуры.

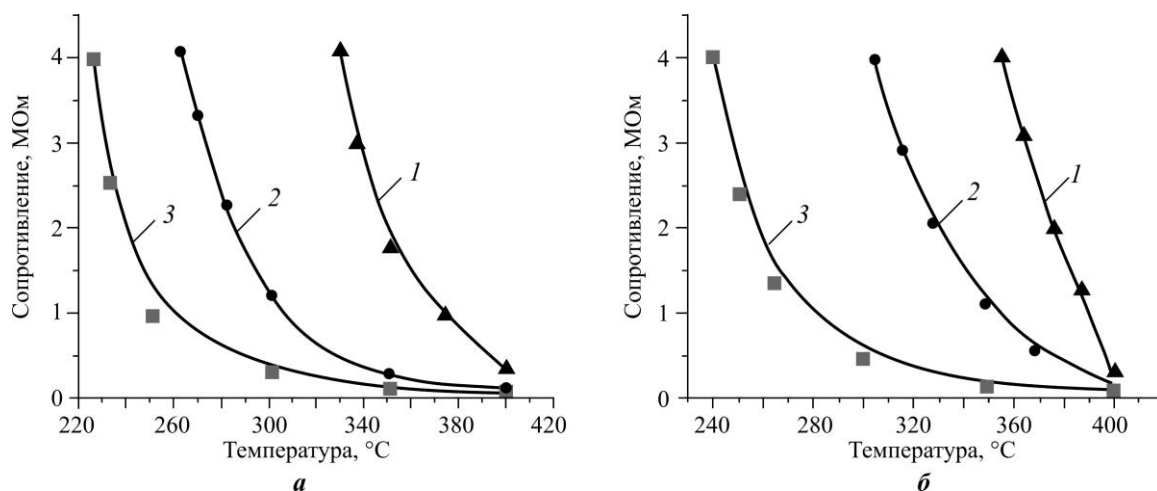


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления свинцово-силикатных стекол C87-2 (а) и C78-4 (б):
 1 – до обработки; 2 – после обработки в HF; 3 – после обработки в NaOH

Fig. 3. Temperature dependence of lead silicate glass resistance C87-2 (a) and C78-4 (b):
 1 – before processing; 2 – after processing in HF; 3 – after processing in NaOH

Анализ угловых коэффициентов рассчитанных прямых показал равенство энергий активации электропроводности E_a для всех дисков, которая составила порядка 0,7–0,8 эВ. Трактовать полученные результаты можно следующим образом. Известно, что полная электропроводность свинцово-силикатных стекол складывается из объемной и поверхностной проводимости [11]. Объемную электропроводность стекол определяет их химический состав, поэтому ее невозможно изменить. Напротив, поверхностная проводимость изменяется не только в зависимости от химического состава стекла, но от температуры и состава поверхностного слоя, на который, в свою очередь, оказывает влияние окружающая среда. В рассматриваемом случае такой средой является кислотный или щелочной раствор, с которым контактировали образцы. Эти растворы взаимодействуют с диоксидом кремния SiO_2 , входящим в состав стекол. Можно предположить, что разрушение кремниевого каркаса стекла приводит к выходу в растворы подвижных щелочных и щелочноземельных ионов. Об этом свидетельствуют данные работы [12], где авторы, анализируя отработанные травящие растворы HF (10^{-3} – 10^{-1} моль/л), показали, что для свинцово-силикатных стекол помимо растворения кремния наблюдается и выщелачивание свинца. Очевидно, что кроме растворения компонентов стекол будет наблюдаться и обратный процесс адсорбции растворенных частиц на поверхность. В результате на поверхности стекол формируется слой, содержащий также и катионы щелочных и щелочноземельных элементов.

В работе [9] установлено, что в свинцово-силикатных стеклах преобладает ионная проводимость, причем носителями заряда являются в основном ионы щелочных и щелочноземельных металлов. Их присутствие в составе изучаемых стекол указывает на то, что катионы натрия и бария из объема и поверхностных слоев определяют электропроводность свинцово-силикатных стекол.

Заключение. Проведенные исследования показали следующее. При обработке в растворах NaOH (1,39 н) и HF (0,05 н) изменяется электрическое сопротивление стекол C87-2 и C78-4 на два порядка при температуре 300 °С. Этому способствует растворение щелочных и щелочноземельных компонентов стекол в изученных растворах и обратный переход подвижных в основном однозарядных ионов из раствора в поверхно-

стные слои стекол. Химическая обработка не влияет на механизм проводимости и тип носителей заряда.

Материалы статьи доложены на 7-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника – 2023» (31 января – 6 февраля 2023 г., Кабардино-Балкарская Республика, пос. Эльбрус).

Литература

1. Мазурицкий М. И., Лерер А. М., Кулов С. К., Самканашвили Д. Г. Структура поверхности микроканальных пластин и возбуждение рентгеновской флуоресценции внутри полых микрокапилляров // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 6. С. 43–52. <https://doi.org/10.1134/S020735281906009X>. – EDN: WKNXHS.
2. Кулов С. К. Микроканальные пластины для электронно-оптических преобразователей. Владикавказ: СКГТУ, 1998. 196 с.
3. Система для регистрации сверхслабых оптических сигналов / С. К. Кулов, А. М. Кабышев, Д. В. Бестфатер и др. // Датчики и системы. 2015. № 5 (192). С. 40–43. EDN: TWFBWP.
4. Gys T. Micro-channel plates and vacuum detectors // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2015. Vol. 787. P. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.044>
5. Аихотов О. Г., Магкоев Т. Т., Аихотова И. Б. Взаимодействие свинцово-силикатных стекол с разбавленными растворами фтористоводородной кислоты // Стекло и керамика. 2021. № 5. С. 40–43. EDN: OFVYRV.
6. Алкацева Т. Д. Закономерности формирования и минимизация дефектов электронного изображения микроканальных пластин: дис. ... канд. техн. наук. Владикавказ, 1999. 247 с. EDN: QDDNHH.
7. Хатухов А. А., Аихотов О. Г. Измерение сопротивления каналов микроканальных пластин с минимизацией токов утечки // Прикладная физика. 2003. № 4. С. 123–128.
8. Аихотова И. Б. Влияние физико-химических операций на процесс формирования исполнительской поверхности микроканальных пластин: дис. ... канд. техн. наук. Владикавказ, 2003. 167 с. EDN: NMMPRZ.
9. Хатухов А. А. Закономерности формирования резистивных свойств микроканальных пластин: дис. ... канд. техн. наук. Нальчик, 2003. 136 с.
10. Авдеев К. А., Кулов С. К., Самканашвили Д. Г. Поведение сотовой структуры электронного изображения микроканальных пластин на хранении // Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования: сб. науч. тр. по материалам XXXVI Междунар. науч.-практ. конф. (Анапа, 30 дек. 2022). Анапа: «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2022. С. 6–11. EDN: NAYFSN.
11. Химическая технология стекла и сплавов: учебник для вузов / М. В. Артамонова, М. С. Асланова, И. М. Бужинский и др.; под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1983. 432 с.
12. Взаимодействие свинцово-силикатного стекла с разбавленными растворами плавиковой кислоты / В. А. Толмачев, М. А. Окатов, В. В. Пальчевский и др. // Физика и химия стекла. 1990. Т. 16. № 1. С. 107–110.

Статья поступила в редакцию 12.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 12.06.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Аихотов Олег Газизович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники и цифровых информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), oandi@rambler.ru

Аихотова Ирина Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), oandi@rambler.ru

Магкоев Тимерлан Таймуразович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и технологии наноструктур Северо-Осетинского государственного университета им. К. Л. Хетагурова (Россия, 362025, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46), t_magkoev@mail.ru

References

1. Mazuritskiy M. I., Lerer A. M., Dabagov S. B., Marcelli A., Hampai D., Dziedzic-Kocurek K. Focusing properties of bent micro-channel plates in the X-ray range. *J. Surf. Investig.*, 2019, vol. 13, iss. 6, pp. 1005–1013. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060144>
2. Kulov S. K. *Microchannel plates for electro-optical converters*. Vladikavkaz, NCIMM (STU), 1998. 196 p. (In Russian).
3. Kulov S. K., Kabyshev A. M., Bestvater D. V., Ryzhkov A. A., Fedotova G. V. The system for the registration of ultra-weak optical signals. *Datchiki & Systemi = Sensors & Systems*, 2015, no. 5 (192), pp. 40–43. (In Russian). EDN: TWFBWP.
4. Gys T. Micro-channel plates and vacuum detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2015, vol. 787, pp. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.044>
5. Ashkhotov O. G., Magkoev T. T., Ashkhotova I. B. Interaction of lead silicate glasses with dilute solutions of hydrofluoric acid. *Steklo i Keramika = Glass and Ceramics*, 2021, no. 5, pp. 40–43. (In Russian). EDN: OFVYRV.
6. Alkatseva T. D. *Regularities of formation and minimization of defects in the electronic image of microchannel plates*, diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Vladikavkaz, 1999. 247 p. (In Russian). EDN: QDDNHH.
7. Khatukhov A. A., Ashkhotov O. G. Measurement of channel resistance of microchannel plates. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2003, no. 4, pp. 123–128. (In Russian).
8. Ashkhotova I. B. *Impact of physical-chemical operations on the process of formation of the executive surface of microchannel plates*, diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Vladikavkaz, 2003. 167 p. (In Russian). EDN: NMMPRZ.
9. Khatukhov A. A. *Regularities of formation of resistive properties of microchannel plates*, diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Nal'chik, 2003. 136 p. (In Russian).
10. Avdeev K. A., Kulov S. K., Samkanashvili D. G. Behavior of the cellular structure of the electronic image of microchannel plates in storage. *Prioritety mirovoy nauki: novye podkhody i aktual'nye issledovaniya*, collection of scientific papers based on the materials of the 36th International research-to-practice conference (Anapa, Russia, 30 Dec. 2022). Anapa, "NITs ESP" v YuFO Publ., 2022, pp. 6–11. (In Russian). EDN: NAYFSN.
11. Artamonova M. V., Aslanova M. S., Buzhinsky I. M. et al. *Chemical technology of glass and alloys*, textbook for universities, ed. N. M. Pavlushkin. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 432 p. (In Russian).
12. Tolmachev V. A., Okatov M. A., Pal'chevskiy V. V. et al. Interaction of lead-silicate glass with dilute solutions of fluoride acid. *Fizika i himia stekla*, 1990, vol. 16, no. 1, pp. 107–110. (In Russian).

The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 12.06.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Oleg G. Ashkhotov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), oandi@rambler.ru

Irina B. Ashkhotova – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), oandi@rambler.ru

Tamerlan T. Magkoev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Physics and Nanostructure Technology Department, North Ossetian State University named after K. L. Khetagurov (Russia, 362025, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Vatutin st., 44-46), t_magkoev@mail.ru

Электрический транспорт в пористых структурах Si-Ge/c-Si, сформированных электрохимическим осаждением германия в пористый кремний

Д. Л. Горошко¹, И. М. Гаврилин², А. А. Дронов², О. А. Горошко¹, Л. С. Волкова³,
Н. Л. Гревцов⁴, Е. Б. Чубенко⁴, В. П. Бондаренко⁴

¹Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

³Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия

⁴Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь

goroshko@iacp.dvo.ru

Аннотация. Пленочные структуры на основе твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 1$) в настоящее время получают методами химического осаждения из газовой фазы. Для приборного применения полученных структур необходимо знать электрофизические свойства материала, синтезированного при разных условиях. В работе проведены гальваномагнитные исследования электропроводности в пористых и сплошных пленках $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, а также концентрации и подвижности основных носителей заряда в них при температуре 30–300 К. Показано, что, как и в чистых кремнии и германии сравнимой пористости, электропроводность в исследованных образцах можно рассматривать как в среде с пустотами. Установлено, что тип основных носителей заряда в сплаве определяется типом использованной кремниевой подложки. Это практически важно для создания обоих плеч термоэлектрического преобразователя, что делает метод получения сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ перспективным для приборного применения, в частности в термоэлектрических преобразователях и литий-ионных аккумуляторах.

Ключевые слова: сплав Si-Ge, электропроводность, электрохимическое осаждение германия, пористый кремний, подвижность, концентрация носителей

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-19-00720, <https://rscf.ru/project/20-19-00720/>).

Для цитирования: Электрический транспорт в пористых структурах Si-Ge/c-Si, сформированных электрохимическим осаждением германия в пористый кремний / Д. Л. Горошко, И. М. Гаврилин, А. А. Дронов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 734–744. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-734-744>. – EDN: YHKEJH

Original article

Electrical transport in porous Si-Ge/c-Si structures formed by electrochemical deposition of germanium into porous silicon

D. L. Goroshko¹, I. M. Gavrilin², A. A. Dronov², O. A. Goroshko¹, L. S. Volkova³,
N. L. Grevtsov⁴, E. B. Chubenko⁴, V. P. Bondarenko⁴

¹*Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

²*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

³*Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁴*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

goroshko@iacp.dvo.ru

Abstract. Film structures based on the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 1$) solid solutions are currently obtained by chemical vapor deposition. For instrumental application of obtained structures it is necessary to know electrophysical properties of material synthetically produced under different circumstances. In this work, galvanomagnetic studies of electrical conductivity in porous and continuous $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ films, as well as of main charge carriers concentration and mobility, are performed. It was demonstrated that, as in pure silicon and germanium of comparable porosity, the electrical conductivity in the studied samples can be considered as in a medium with voids. It has been established that main charge carriers' type in the alloy is determined by type of the used silicon substrate. This is practically important for creating both arms of the thermoelectric converter, which makes the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 1$) alloy fabrication method promising for instrumental application, particularly in thermoelectric converters and lithium-ion batteries.

Keywords: Si-Ge alloy, electrical conductivity, germanium electrochemical deposition, porous silicon, mobility, carrier concentration, electrical conductivity

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant no. 20-19-00720, <https://rscf.ru/project/20-19-00720/>).

For citation: Goroshko D. L., Gavrilin I. M., Dronov A. A., Goroshko O. A., Volkova L. S., Grevtsov N. L., Chubenko E. B., Bondarenko V. P. Electrical transport in porous Si-Ge/c-Si structures formed by electrochemical deposition of germanium into porous silicon. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 734–744. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-734-744>. – EDN: YHKEJH.

Введение. Кремний-германиевый сплав $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 1$) является перспективным материалом для термоэлектрических преобразователей [1] и анодов литий-ионных аккумуляторов [2], что связано с уникальными электрохимическими свойствами такого сплава по сравнению с чистыми материалами. Современные исследования направлены

на улучшение свойств данных приборов, в том числе путем наноструктурирования – создания пористых и нанокристаллических пленок $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ [3, 4].

На сегодняшний день пленочные структуры на основе твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в основном получают методами химического осаждения из газовой фазы, такими как плазмохимическое осаждение [5], осаждение при пониженном давлении [6], реактивное термохимическое осаждение [7]. Используют также магнетронное или электронно-лучевое испарение либо отдельных мишеней Si и Ge, либо готового сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ [8]. Однако сопутствующая перечисленным методам высокая стоимость кристаллического Ge и его газообразных прекурсоров, а также необходимость в сложном технологическом оборудовании препятствуют широкому практическому использованию пленочных структур на основе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

В работах [9, 10] предложен новый подход к формированию сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, где в качестве прекурсора применяется диоксид германия. Этот метод включает в себя электрохимические процессы формирования пористого кремния с последующей термической обработкой. Такой подход позволяет формировать пленки $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с контролируемым в широких пределах содержанием германия при относительно низких затратах, что является важным для практического применения. Отличительная особенность данного подхода – возможность получать как пористые, так и сплошные пленки сплава.

Очевидно, что для приборного применения полученных структур важно знать электрофизические свойства синтезированного при разных условиях материала. В настоящей работе проводятся гальваноманнитные исследования электропроводности в пористых и сплошных пленках сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, исследуются концентрация и подвижность основных носителей заряда в них при комнатной и пониженной температурах.

Методы исследования. Для формирования пористого кремния методом металлостимулированного травления использовали пластины монокристаллического кремния (100) дырочного (КДБ-12, образцы Б5 и Б30) и электронного (КЭФ-20, образцы Ф5 и Ф30) типа проводимости с удельным сопротивлением 12 и 20 Ом·см соответственно. Процесс электрохимического осаждения германия в матрицу пористого кремния осуществляли в растворе, содержащем 0,05 М оксида германия (IV) GeO_2 , 0,5 М сульфата калия K_2SO_4 и 0,1 М янтарной кислоты. Сплав $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ синтезировали методом быстрого термического отжига в установке RTP System AS-One 100 (Франция). Отжиг проводили в потоке аргона (скорость потока $800 \text{ см}^3/\text{мин}$) при температуре 1223 К в течение 5 с (образцы Б5 и Ф5) и 30 с (образцы Б30 и Ф30). Скорость нагрева составляла 10 К/с. Подробное описание условий формирования образцов дано в работе [7]. Морфологию образцов исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) в двухлучевом сканирующем электронном микроскопе FEI Helios G4 CX (США). Линии Стокса комбинационного рассеяния света (КРС) изучали с использованием конфокального КРС спектрометра NTEGRA Spectra II (Россия). Возбуждение осуществляли He-Ne-лазером с постоянной накачкой на длине волны 632,83 нм. Оптические спектры регистрировали с использованием фурье-спектрофотометра Bruker Vertex v80 (Германия).

Измерения электрофизических свойств образцов выполняли на установке Oxford Teslatron (Англия) в диапазоне температур 300–30 К и магнитных полей до 0,5 Тл. Измерения проводили при подключении образца по геометрии ван дер Пау при токе 0,1–1 мкА. Для этого из подложки со сформированным на ней слоем твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ вырезали квадрат со стороной 2,5–3 мм. Образец закрепляли на держателе клемм и подключали к контактным площадкам с помощью алюминиевой проволоки. Предварительно по углам образца осаждали контакты из алюминия или золота толщиной 200 нм, к которым проволоку приклеивали с помощью токопроводящего клея.

Результаты и их обсуждение. Характерная структура слоев сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, отожженного в течение 5 с (образец Ф5) и 30 с (образец Ф30), представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что увеличение продолжительности отжига приводит к получению более плотного слоя сплава. Во всех случаях пленка состоит из гранул с латеральным размером 0,2–0,5 мкм, а ее толщина составляет около 0,5 мкм. Структура пленок сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ образцов Б5 и Б30 выглядит аналогично структуре пленки образца Ф5, т. е. состоит из слоя крупных гранул с высокой пористостью. Толщина пористого слоя в них также не превышает 0,5–0,6 мкм. Причины отсутствия сплошного слоя на образце Б30 могут быть связаны с особенностями заполнения германием пористого кремния электропроводности *p*-типа. Обнаруженный эффект будет проанализирован в дальнейших исследованиях.

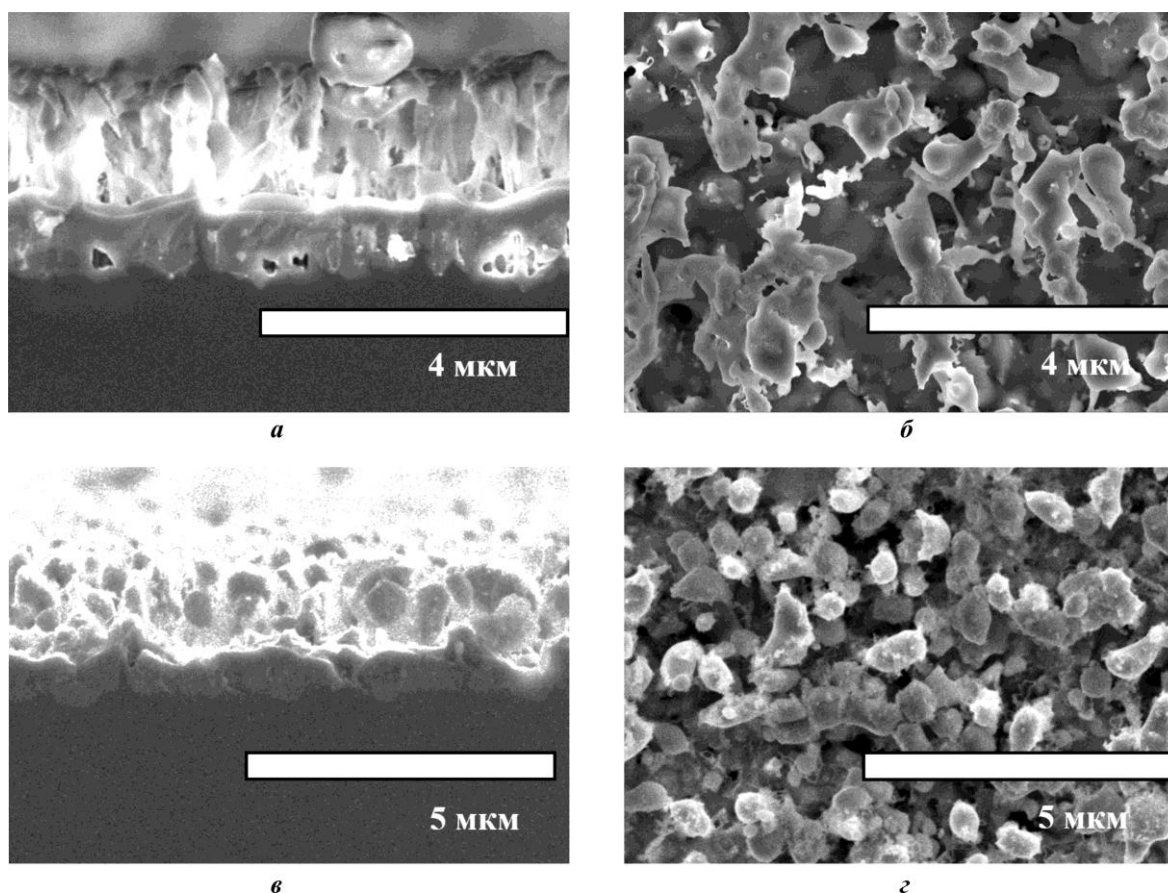


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов Ф5 (а, б) и Ф30 (в, г): а, в – поперечное сечение; б, г – вид сверху
 Fig. 1. SEM images of samples Ф5 (a, b) and Ф30 (c, d): a, c – cross section; b, d – top view

На рис. 2, а представлен типичный спектр КРС от поверхности образца Ф30. В области частот оптических фононов кремния и германия наблюдаются четыре характерных пика, соответствующих связям Ge–Ge ($285\text{--}295\text{ см}^{-1}$), Ge–Si ($402\text{--}408\text{ см}^{-1}$), Si–Si ($470\text{--}500\text{ см}^{-1}$) в кремний-германиевом сплаве [11] и Si–Si в кремниевой подложке ($\sim 520\text{ см}^{-1}$). Дополнительно к этим пикам на всех образцах отмечается пик с положением $\sim 428\text{ см}^{-1}$, соответствующий локальным колебаниям связей Si–Si в присутствии германия [12]. На рис. 2, б представлен результат картирования спектрального положения пика КРС из диапазона, соответствующего оптическим колебаниям связей Si–Si в кремний-германиевом сплаве на различных областях поверхности образца. Видно,

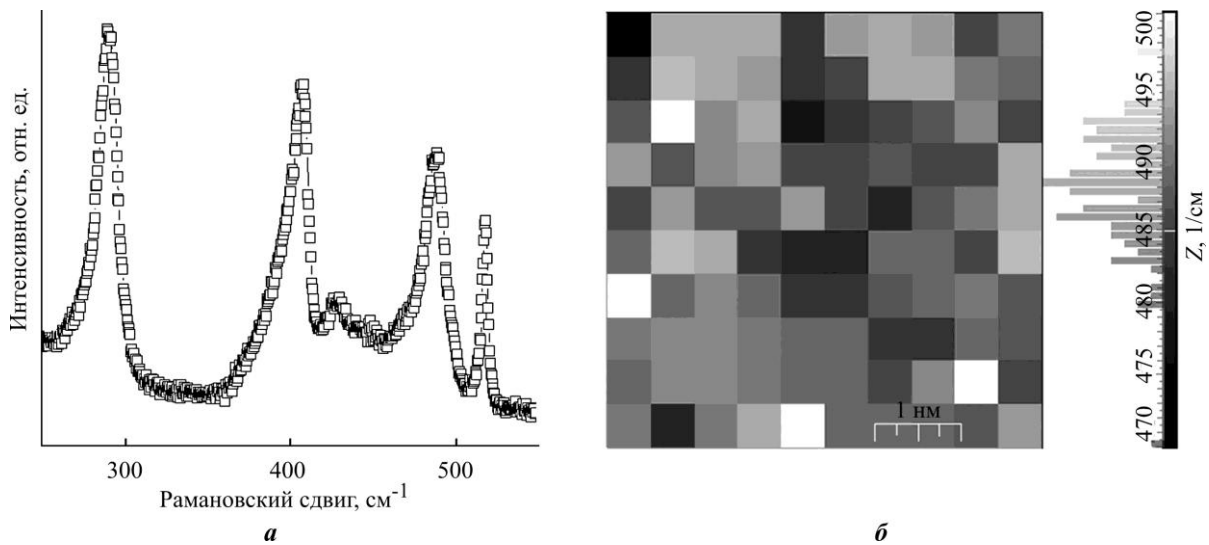


Рис. 2. Характерный спектр КРС от поверхности образца Ф30 (а) и карта поверхности образца Ф30 размером 5×5 мкм, полученная на основе спектров КРС (б) (черно-серым цветом обозначено положение максимума пика КРС оптических фононов для связей Si–Si в пленке сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$)
 Fig. 2. Raman spectrum from surface of sample Ф30 (a) and surface map of sample Ф30 of 5×5 μm size obtained from Raman spectra (b) (the black-gray colour indicates the position of the maximum peak of the optical phonon for Si–Si bonds in the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloy film)

что состав сплава в разных местах неоднороден, поскольку положение данного пика варьируется в диапазоне $470\text{--}500\text{ см}^{-1}$ с максимумом распределения при 487 см^{-1} . По данным [12], в твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ эти положения соответствуют $x = 0,7; 0,29; 0,47$. Вероятной причиной неоднородности состава сплава по поверхности является разная степень заполнения пористого кремния германием перед отжигом, а также сложная динамика высокотемпературного отжига этой структуры.

Результаты гальваномангнитных измерений образцов, а также подложек, на которых они сформированы, в диапазоне температур $30\text{--}300\text{ К}$ приведены на рис. 3, где вместо удельного сопротивления и объемной концентрации носителей заряда представлены их слоевые величины. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, с точки зрения электропроводности толщина пористого слоя, определенная по РЭМ-изображениям, не является корректным значением для расчета удельных значений. Во-вторых, для части температурного диапазона графики представляют собой эффективные значения, в которые вносят свой вклад как пленка, так и подложка. Тем не менее для оценки, например, объемной концентрации или удельной электропроводности можно пользоваться реальной толщиной подложки или толщиной сплошного слоя пористого сплава. Видно, что с учетом толщины подложек, равной 470 мкм , при комнатной температуре их параметры хорошо совпадают с паспортными значениями кремниевых пластин, из которых они вырезаны: концентрация $1,5 \cdot 10^{15}$ и $1,3 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$, подвижность 300 и $1300\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (рис. 3, а), удельное сопротивление 14 и $37\text{ Ом} \cdot \text{см}$ для подложек КДБ-12 и КЭФ-20 соответственно [13]. Тип основных носителей заряда, определенный по результатам измерений Холла, соответствует электронам для КЭФ-20 и дыркам для КДБ-12. Концентрация основных носителей в них практически не изменяется в диапазоне $\sim 100\text{--}300\text{ К}$ (область истощения примеси). При температуре менее 100 К наблюдается вымораживание примеси с энергией активации $\sim 0,045\text{ эВ}$, что хорошо соответствует табличным данным для бора и фосфора [13].

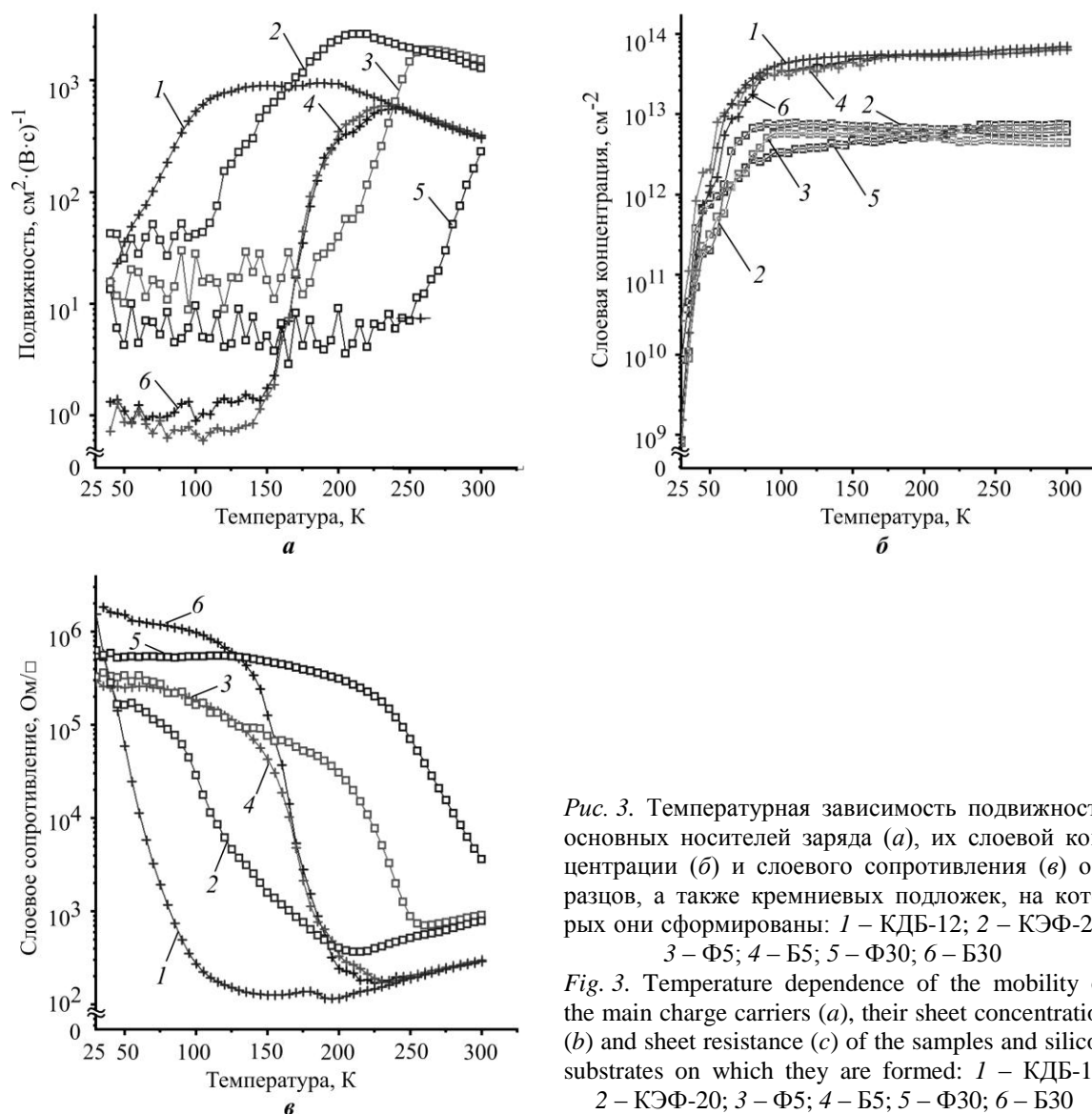


Рис. 3. Температурная зависимость подвижности основных носителей заряда (а), их слоевой концентрации (б) и слоевого сопротивления (в) образцов, а также кремниевых подложек, на которых они сформированы: 1 – КДБ-12; 2 – КЭФ-20; 3 – Ф5; 4 – Б5; 5 – Ф30; 6 – Б30

Fig. 3. Temperature dependence of the mobility of the main charge carriers (a), their sheet concentration (b) and sheet resistance (c) of the samples and silicon substrates on which they are formed: 1 – КДБ-12; 2 – КЭФ-20; 3 – Ф5; 4 – Б5; 5 – Ф30; 6 – Б30

Основная сложность изучения электрофизических свойств тонких пленок на проводящих подложках заключается в учете эффекта шунтирующего влияния подложки на свойства пленки. Обычно для этого применяют подложки с минимально возможной электропроводностью. В рассматриваемом случае это требование невыполнимо, поскольку на данном этапе исследований сплав $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ формировали в слое пористого кремния, не отделенном от исходной монокристаллической подложки, характеризующейся относительно низким удельным сопротивлением.

Ослабить или даже полностью исключить эффект шунтирования возможно, если на интерфейсе пленка – подложка формируется запирающий переход. По данным оптических измерений, в области 0,9–1,4 эВ все исследованные образцы демонстрируют красное смещение края спектра пропускания относительно монокристаллической подложки. Это явление означает уменьшение ширины запрещенной зоны в пленке по сравнению с кремнием. Поскольку по данным КРС пленка состоит из сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со средним содержанием Ge 47 %, следует ожидать уменьшения ширины запрещенной зоны в ней до 1,0 эВ [14]. Сплошной слой на образце Ф30 формирует с подложкой

непрерывный гетеробарьер в области металлургической границы, через который под соответствующей контактной площадкой при определенном направлении пропускания тока возникает обратно включенный выпрямляющий переход. В случае пористой пленки на стенках пор может формироваться высокая плотность локализованных внутри запрещенной зоны состояний, а формируемый при этом на поверхности обогащенный слой может быть проводником токов утечки. Если поры в пленке сплава сквозные и достигают кремниевой подложки, ток может стекать по стенкам пор в подложку, которая будет оказывать шунтирующий эффект. При понижении температуры эти состояния вымораживаются и образец переходит в состояние с обратно включенным гетеропереходом.

Эффект шунтирующего влияния подложки на результаты измерений хорошо иллюстрируется сравнением результатов электрических измерений подложек и образцов с пленками. Для образцов Б5, Б30 и Ф5 измеренные подвижность (см. рис. 3, а), слоевая концентрация (рис. 3, б) и слоевое сопротивление (рис. 3, в) при охлаждении образцов на дырочном и электронном кремнии до 250 и 200 К соответственно не отличаются от таковых для кремниевых подложек. Это означает полное шунтирование пленок подложкой. Разная температура «отключения» шунтирования связана с разной энергией активации поверхностных состояний в образцах, сформированных на электронном и дырочном кремнии. В свою очередь, образец Ф30 уже при комнатной температуре демонстрирует более высокое слоевое сопротивление и значительно меньшую подвижность, что указывает на отсутствие шунтирующего эффекта. Действительно, согласно РЭМ-изображениям (см. рис. 1, в) только образец Ф30 характеризуется сплошной пленкой сплава, а на образцах Б5, Б30 и Ф5 эта пленка отличается высокой степенью пористости (см. рис. 1, а). Для этих трех образцов при понижении температуры наблюдается рост слоевого сопротивления (см. рис. 3, в) и резкое падение подвижности (см. рис. 3, а). При этом по порядку значений эти величины в данных образцах приближаются к образцу Ф30. Таким образом, можно считать, что результаты измерений отражают процессы, происходящие непосредственно в пленках сплава $Si_{1-x}Ge_x$ для образцов Б5, Б30 и Ф5 при температурах менее 175 и 225 К соответственно, а для образца Ф30 – во всем исследованном температурном диапазоне.

В температурном диапазоне отсутствия шунтирующего эффекта слоевое сопротивление пленок $Si_{1-x}Ge_x$ возрастает при уменьшении температуры (рис. 3, в). Полученная из построения Аррениуса энергия активации проводимости составляет соответственно 340 и 380 мэВ для образцов Б5 и Б30 и 900 и 760 мэВ для образцов Ф5 и Ф30. Следует отметить, что по порядку величины эти значения сопоставимы с энергией активации проводимости пористого кремния [15], что свидетельствует об одинаковых механизмах токопереноса в пористых материалах разного состава. Слоевое сопротивление для сплошной пористой пленки образца Ф30 при комнатной температуре в пять раз выше, чем слоевое сопротивление соответствующей подложки (см. рис. 3, в). Такой же эффект увеличения сопротивления двуслойной системы пористый кремний / кристаллический кремний наблюдался ранее [16] даже для существенно более низкоомных подложек с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см. В работе [16] промоделирована электропроводность таких образцов, что позволило объяснить наблюдаемые эффекты проводимостью по среде с пустотами. При этом сделан вывод, что свойства пористой матрицы не меняются: в ней остается высокая концентрация носителей заряда, находившихся в монокристалле, из которого получен пористый материал. Результаты, полученные авторами настоящей статьи, подтверждают такое заключение. Об этом свидетельствует слабо отличающаяся от подложки слоевая концентрация носителей заряда в пленках сплава (рис. 3, б). Тип основных носителей заряда, определенный из знака

напряжения Холла, для всех пленок сплава во всем исследованном диапазоне температур не отличается от типа проводимости подложек. С учетом изложенного этот эффект очевиден, поскольку бор и фосфор являются мелкой акцепторной и донорной примесью как для кремния, так и для германия [13].

Анализ подвижности основных носителей заряда, определенной из измерений Холла в области отсутствия шунтирования подложкой, показал более высокую подвижность в образцах Ф5 и Ф30, сформированных на *n*-кремнии (см. рис. 3, *a*). Таким образом, аналогично объемному кремнию и германию и их сплавов, в которых при сравнимых уровнях легирования подвижность электронов выше, чем дырок, данный эффект наблюдается и в пористом материале, что также указывает на сохранение свойств объемного материала в каркасе пористого кремний-германиевого сплава. В свою очередь, 50–100-кратное снижение подвижности в пленках объясняется дополнительным рассеянием носителей заряда на развитой поверхности пор, а также пространственной флуктуацией зон проводимости по причине вариации состава пленки. По порядку величины при температуре 30–200 К подвижность в электронных пленках составляет 6–30 см²/(В·с), а в дырочных – около 2 см²/(В·с) (см. рис. 3, *a*).

Заключение. Выполненные исследования электрофизических свойств пористых сплавов Si_{1-x}Ge_x со средним $x = 0,47$, сформированных на кремниевых подложках методом электрохимического осаждения германия в матрицу пористого кремния, показали, что в области отсутствия шунтирующего вклада от подложки качественное поведение температурных зависимостей подвижности, концентрации и сопротивления всех образцов не зависит от продолжительности термообработки и типа электропроводности подложки. По порядку величины измеренных электрофизических параметров полученный результат совпадает с известными литературными данными о низкотемпературных измерениях гальваномагнитных свойств пористых пленок чистого кремния и германия. Измерения показали, что шунтирующий вклад подложки пропадает при низких температурах и связан не с вымораживанием носителей заряда в подложке, а с выпрямляющими свойствами гетеробарьера на интерфейсе сплав Si_{1-x}Ge_x – монокристаллический кремний. При высоких температурах возникает ток утечки в подложку по стенкам пор сплава. В случае формирования сплошного пористого слоя такая утечка отсутствует и результаты измерений отражают процессы, происходящие непосредственно в пленке сплава.

Установлено, что, как и в чистых кремнии и германии сравнимой пористости, электропроводность в исследованных образцах можно рассматривать как в среде с пустотами. При этом практически важным результатом исследования формирования пленок сплава на кремниевых подложках является то, что тип проводимости сплава определяется типом легирования подложки. Этот аспект важен при создании *n*- и *p*-плеч термоэлектрического преобразователя, что с учетом простоты и масштабируемости предлагаемого метода получения сплава Si_{1-x}Ge_x делает его перспективным для приборного применения.

Литература

1. *Basu R., Singh A.* High temperature Si-Ge alloy towards thermoelectric applications: A comprehensive review // *Mater. Today Phys.* 2021. Vol. 21. Art. ID: 100468. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100468>
2. Unique structural design and strategies for germanium-based anode materials toward enhanced lithium storage / *D. Li, H. Wang, T. Zhou et al.* // *Adv. Energy Mater.* 2017. Vol. 7. Iss. 23. Art. No. 1700488. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700488>
3. Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials / *Z. Ma, J. Wei, P. Song et al.* // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2021. Vol. 121. Art. ID: 105303. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105303>

4. Structural strategies for germanium-based anode materials to enhance lithium storage / **J. Hao, Y. X. Wang, Q. J. Guo et al.** // Part. Part. Syst. Charact. 2019. Vol. 36. Iss. 9. Art. ID: 1900248. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201900248>
5. Boron-doped nanocrystalline silicon germanium thin films for uncooled infrared bolometer applications / **R. Xu, W. Li, J. He et al.** // Infrared Phys. Technol. 2013. Vol. 58. P. 32–35. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.01.005>
6. **Lu J., Guo R., Dai W., Huang B.** Enhanced in-plane thermoelectric figure of merit in p-type SiGe thin films by nanograin boundaries // Nanoscale. 2015. Vol. 7. Iss. 16. P. 7331–7339. <https://doi.org/10.1039/C5NR00181A>
7. In-situ phosphorous-doped SiGe layer on Si substrate by reactive thermal chemical vapor deposition at low temperature / **K. Tao, J. Wang, Y. Sun et al.** // Mater. Sci. Semicond. Process. 2015. Vol. 38. P. 137–141. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.04.024>
8. **Hamdoh A., Kaneko T., Isomura M.** Formation of crystalline silicon-germanium thin films on silicon substrates by solid phase crystallization // Thin Solid Films. 2018. Vol. 645. P. 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.10.002>
9. Raman spectra of silicon/germanium alloy thin films based on porous silicon / **E. B. Chubenko, N. L. Grevtsov, V. P. Bondarenko et al.** // J. Appl. Spectrosc. 2022. Vol. 89. Iss. 5. P. 829–834. <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01432-3>
10. A new approach for producing of film structures based on $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ / **I. M. Gavrilin, N. L. Grevtsov, A. V. Pavlikov et al.** // Mater. Lett. 2022. Vol. 313. Art. ID: 131802. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131802>
11. **Lannin J. S.** Vibrational and Raman-scattering properties of crystalline $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ alloys // Phys. Rev. B. 1977. Vol. 16. Iss. 4. P. 1510–1518. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.16.1510>
12. **Alonso M. I., Winer K.** Raman spectra of $c\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 39. Iss. 14. P. 10056–10062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.10056>
13. Handbook series on semiconductor parameters: in 2 vol. / eds **M. E. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur.** Vol. 1: Si, Ge, C (diamond), GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb. Singapore: World Scientific, 1996. 232 p.
14. **Braunstein R., Moore A. R., Herman F.** Intrinsic optical absorption in germanium-silicon alloys // Phys. Rev. 1958. Vol. 109. Iss. 3. P. 695–709. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.695>
15. Carrier transport in porous-Si/Ni/c-Si nanostructures / **A. K. Fedotov, S. L. Prischepa, I. A. Svito et al.** // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 657. P. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.105>
16. **Зимин С. П.** Эффект Холла в низкоомном пористом кремнии // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 7. С. 55–59.

Статья поступила в редакцию 01.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.08.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Горошко Дмитрий Львович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории оптики и электрофизики Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5), goroshko@iacp.dvo.ru

Гаврилин Илья Михайлович – кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gavrilin.ilya@gmail.com

Дронов Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), noiz@mail.ru

Горошко Ольга Александровна – кандидат физико-математических наук, старший инженер лаборатории оптики и электрофизики Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5), olgagoroshko@dvo.ru

Волкова Лидия Сергеевна – младший научный сотрудник отдела структурного анализа и метрологии Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), lidiya.volkova.96@mail.ru

Грецов Никита Леонидович – аспирант кафедры микро- и наноэлектроники, младший научный сотрудник лаборатории материалов и структур наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6), hrautsou@gmail.com

Чубенко Евгений Борисович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории материалов и структур наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6), eugene.chubenko@gmail.com

Бондаренко Виталий Парфирович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией материалов и структур наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6), vitaly51@mail.ru

References

1. Basu R., Singh A. High temperature Si–Ge alloy towards thermoelectric applications: A comprehensive review. *Mater. Today Phys.*, 2021, vol. 21, art. ID: 100468. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100468>
2. Li D., Wang H., Zhou T., Zhang W., Liu H. K., Guo Z. Unique structural design and strategies for germanium-based anode materials toward enhanced lithium storage. *Adv. Energy Mater.*, 2017, vol. 7, iss. 23, art. no. 1700488. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700488>
3. Ma Z., Wei J., Song P., Zhang M., Yang L., Ma J., Liu W. et al. Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2021, vol. 121, art. ID: 105303. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105303>
4. Hao J., Wang Y. X., Guo Q. J., Zhao J. P., Li Y. Structural strategies for germanium-based anode materials to enhance lithium storage. *Part. Part. Syst. Charact.*, 2019, vol. 36, iss. 9, art. ID: 1900248. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201900248>
5. Xu R., Li W., He J., Sun Y., Jiang Y.-D. Boron-doped nanocrystalline silicon germanium thin films for uncooled infrared bolometer applications. *Infrared Phys. Technol.*, 2013, vol. 58, pp. 32–35. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.01.005>
6. Lu J., Guo R., Dai W., Huang B. Enhanced in-plane thermoelectric figure of merit in p-type SiGe thin films by nanograin boundaries. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, iss. 16, pp. 7331–7339. <https://doi.org/10.1039/C5NR00181A>
7. Tao K., Wang J., Sun Y., Jia R., Jin Z. In-situ phosphorous-doped SiGe layer on Si substrate by reactive thermal chemical vapor deposition at low temperature. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2015, vol. 38, pp. 137–141. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.04.024>
8. Hamdoh A., Kaneko T., Isomura M. Formation of crystalline silicon-germanium thin films on silicon substrates by solid phase crystallization. *Thin Solid Films*, 2018, vol. 645, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.10.002>
9. Chubenko E. B., Grevtsov N. L., Bondarenko V. P., Gavrilin I. M., Pavlikov A. V., Dronov A. A., Volkova L. S., Gavrilov S. A. Raman spectra of silicon/germanium alloy thin films based on porous silicon. *J. Appl. Spectrosc.*, 2022, vol. 89, iss. 5, pp. 829–834. <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01432-3>
10. Gavrilin I. M., Grevtsov N. L., Pavlikov A. V., Dronov A. A., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., Gavrilov S. A. A new approach for producing of film structures based on Si_{1-x}Ge_x. *Mater. Lett.*, 2022, vol. 313, art. ID: 131802. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131802>
11. Lannin J. S. Vibrational and Raman-scattering properties of crystalline Ge_{1-x}Si_x alloys. *Phys. Rev. B*, 1977, vol. 16, iss. 4, pp. 1510–1518. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.16.1510>
12. Alonso M. I., Winer K. Raman spectra of c-Si_{1-x}Ge_x alloys. *Phys. Rev. B*, 1989, vol. 39, iss. 14, pp. 10056–10062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.10056>
13. Levinshtein M. E., Rumyantsev S., Shur M., eds. *Handbook series on semiconductor parameters*, in 2 vol. Vol. 1. Si, Ge, C (diamond), GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb. Singapore, World Scientific, 1996. 232 p.

14. Braunstein R., Moore A. R., Herman F. Intrinsic optical absorption in germanium-silicon alloys. *Phys. Rev.*, 1958, vol. 109, iss. 3, pp. 695–709. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.695>
15. Fedotov A. K., Prischepa S. L., Svito I. A., Redko S. V., Saad A., Mazanik A. V., Dolgiy A. L., Fedotova V. V. et al. Carrier transport in porous-Si/Ni/c-Si nanostructures. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 657, pp. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.105>
16. Zimin S. P. Hall effect in low-resistance porous silicon. *Pis'ma v ZhTF = Tech. Phys. Lett.*, 1994, vol. 20, iss. 7, pp. 55–59. (In Russian).

The article was submitted 01.08.2023; approved after reviewing 10.08.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Dmitriy L. Goroshko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Laboratory of Optics and Electrophysics, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, 690041, Vladivostok, Radio st., 5) goroshko@iacp.dvo.ru

Ilya M. Gavrilin – Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gavrilin.ilya@gmail.com

Aleksey A. Dronov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher, Deputy Director for Scientific Work of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), noiz@mail.ru

Olga A. Goroshko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Engineer of the Laboratory of Optics and Electrophysics, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, 690041, Vladivostok, Radio st., 5), olgagoroshko@dvo.ru

Lidiya S. Volkova – Junior Scientific Researcher of the Structural Analysis and Metrology Department, Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky ave., 32A), lidiya.volkova.96@mail.ru

Nikita L. Grevtsov – PhD student of the Micro- and Nanoelectronics Department, Junior Scientific Researcher of the Laboratory of Materials and Structures of Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, Petrus Brovka st., 6), hrautsou@gmail.com

Eugene B. Chubenko – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Materials and Structures of Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, Petrus Brovka st., 6), eugene.chubenko@gmail.com

Vitaly P. Bondarenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Materials and Structures of Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, Petrus Brovka st., 6), vitaly51@mail.ru

Управление составом тонких пленок Mo-Si-N-O при реактивном магнетронном распылении

Д. Г. Громов^{1,2}, С. А. Гаврилов¹, Е. А. Лебедев¹, М. В. Силибин¹,
С. В. Дубков¹, А. В. Аникин¹, А. И. Погалов¹, Д. А. Дронова¹, Д. Д. Бутманов¹,
М. Е. Ширяев¹, В. Д. Громов¹, Р. М. Рязанов^{1,3}, Р. А. Шарипов¹, В. А. Беспалов¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²Первый Московский государственный медицинский университет
имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия

³НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

gromadima@gmail.com

Аннотация. При реактивном магнетронном распылении в среде химически активного газа образование химического соединения на поверхности мишени изменяет скорость ее распыления. В результате происходит существенное изменение состава формируемой пленки в узком диапазоне давлений химически активного газа. Для того чтобы технологический цикл был хорошо воспроизводимым, необходимо четко понимать происходящие при распылении процессы, а также обеспечить высокий уровень контроля химически активного газа. В работе исследован процесс формирования тонких пленок Mo-Si-N-O при реактивном магнетронном распылении, которые используются как фазосдвигающие слои фотошаблонов. Рассмотрен теоретико-экспериментальный подход для прогнозирования и управления составом многокомпонентных тонких пленок, формируемых в процессе реактивного магнетронного распыления с использованием двух отдельных мишеней в среде химически активного газа. Приведены экспериментальные результаты изменения состава тонких пленок Mo-Si-N-O в зависимости от давления азота при реактивном магнетронном распылении одновременно двух мишеней – молибдена и кремния. Проведено моделирование изменения состава пленок Mo-Si-N-O с учетом теории газовой кинетики, геометрических характеристик вакуумного оборудования магнетронного распыления и простых физико-химических предположений. Установлено, что ключевым фактором, определяющим состав тонкой пленки, является процесс нитридации мишеней, который приводит к резкому изменению скорости их распыления.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, фазосдвигающие фотошаблоны, нитридизация

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

Для цитирования: Управление составом тонких пленок Mo-Si-N-O при реактивном магнетронном распылении / Д. Г. Громов, С. А. Гаврилов, Е. А. Лебедев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 745–761. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-745-761>. – EDN: WRKMQW

Original article

Composition control of Mo-Si-N-O thin films during reactive magnetron sputtering

D. G. Gromov^{1,2}, S. A. Gavrilov¹, E. A. Lebedev¹, M. V. Silibin¹, S. V. Dubkov¹, A. V. Anikin¹, A. I. Pogalov¹, D. A. Dronova¹, D. D. Butmanov¹, M. E. Shiryayev¹, V. D. Gromov¹, R. M. Ryazanov^{1,3}, R. A. Sharipov¹, V. A. Bespalov¹

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia

gromadima@gmail.com

Abstract. During reactive magnetron sputtering in chemically active gas environment, formation of chemical species on the surface of target changes its sputtering rate. As a result, significant composition change of film being formed occurs in narrow pressure range of chemically active gas. Good reproducibility of fabrication cycle requires precise understanding of processes running in sputtering and high level of chemically active gas control. In this work, the process of Mo-Si-N-O thin films, used as phase-shifting layers of phototemplates, formation by magnetron sputtering is investigated. A theoretical-experimental approach is presented for predicting and controlling the composition of multicomponent thin films formed by reactive sputtering using two separate targets in a chemically active gas environment. Experimental results of Mo-Si-N-O thin films composition change depending on nitrogen pressure during simultaneous reactive magnetron sputtering of two targets, molybdenum and silicon, are given. The character of the Mo-Si-N-O films composition change is substantiated by simulation with consideration to kinetic theory of gases, geometrical characteristics of vacuum magnetron sputtering equipment and simple physical and chemical assumptions. It has been established that key factor determining the thin film composition is the process of targets nitridation that leads to a sharp change in the rate of their sputtering.

Keywords: reactive magnetron sputtering, phase-shifting phototemplates, nitridation

Funding: the work has been performed under state assignment (Agreement FSMR-2023-0014).

For citation: Gromov D. G., Gavrilov S. A., Lebedev E. A., Silibin M. V., Dubkov S. V., Anikin A. V., Pogalov A. I., Dronova D. A., Butmanov D. D., Shiryayev M. E., Gromov V. D., Ryazanov R. M., Sharipov R. A., Bespalov V. A. Composition control of Mo-Si-N-O thin films during reactive magnetron sputtering. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 745–761. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-745-761>. – EDN: WRKMQW.

Введение. Реактивное магнетронное распыление используется для создания оксидных [1, 2], нитридных [3–5], оксинитридных [6, 7] и других покрытий [8, 9] различного функционального назначения. Процесс реализуется в среде смеси инертного газа и соответствующего химически активного газа. Ионное распыление в среде химически активного газа – резко нелинейный процесс, поскольку образование химического соединения на поверхности мишени изменяет скорость ее распыления. Это приводит к тому, что в достаточно узком диапазоне давлений химически активного газа происходит существенное изменение состава формируемой тонкой пленки [10–12]. Ситуация еще более усложняется, когда необходимо наносить пленки сложного состава и магнетронное распыление проводится одновременно с двух мишеней [13, 14]. Примером такого процесса является нанесение пленки Mo-Si-N магнетронным распылением одновременно двух мишеней: молибдена (Mo) и кремния (Si) в смеси газов аргона (Ar) и азота (N) [15, 16]. Поэтому, для того чтобы процесс был технологически хорошо воспроизводимым, необходимо четко понимать происходящие при распылении процессы, установить границы этих изменений и контролировать поток химически активного газа.

Пленки Mo-Si-N характеризуются такими механическими свойствами, как высокая твердость, износостойкость и низкий коэффициент трения, что позволяет использовать их в качестве защитных, износостойких, антифрикционных покрытий [17–19]. Тонкие пленки Mo-Si-N и Mo-Si-N-O также применяются в качестве фазосдвигающих слоев фотошаблонов в технологии нанoeлектроники. Данные слои применяются, когда размеры элементов ИС меньше длины волны излучения, используемого при фотолитографии, для повышения контрастности изображения, которая снижается из-за явления дифракции [20]. Таким образом, с использованием длины волны излучения 248 или 193 нм можно формировать топологию по технологической норме 90 или 65 нм и менее [21, 22]. К фазосдвигающим слоям Mo-Si-N и Mo-Si-N-O предъявляются жесткие требования: фазовый сдвиг на 180° , прозрачность 6 % на длине волны 193 нм, толщина 66–68 нм [21, 22]. В связи с этим процесс реактивного магнетронного распыления необходимо строго контролировать, а также детально понимать его особенности.

Цель настоящей работы – экспериментальное и теоретическое исследование влияния парциального давления активного газа, азота и кислорода, из остаточной атмосферы на состав формируемой тонкой пленки Mo-Si-N-O при одновременном реактивном магнетронном распылении Mo- и Si-мишеней, что необходимо для реализации прогнозируемого управляемого и воспроизводимого способа формирования тонкой пленки Mo-Si-N-O нужного состава. Рассматриваемый подход может быть применен и к другим многокомпонентным системам.

Эксперимент. В качестве подложек для нанесения и исследования слоев использовали титановую фольгу толщиной 30 мкм. Выбор титановой фольги в качестве подложки вместо подложек кремния обусловлен упрощением процесса определения состава формируемой пленки, поскольку кремний входит в состав пленки, что затрудняет оценку точного количества кремния в пленке на фоне кремниевой подложки. Подложки предварительно отмывали в ацетоне в ультразвуковой ванне. Для удаления слоя естественного оксида проводили их травление в растворе $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ при соотношении 1:2:6. После этого подложки тщательно промывали в деионизованной воде и высушивали в парах изопропилового спирта.

Все исследуемые пленки формировали на поверхности подложек методом реактивного магнетронного распыления мишеней в вакууме. Осаждение проводили на установке УРМ-026 при достаточно высоком остаточном давлении газа $7 \cdot 10^{-5}$ торр. Остаточная атмосфера являлась источником кислорода в формируемой пленке Mo-Si-N-O. Подложкодержатели устанавливали на карусели с планетарным вращением. Поверх-

ность подложек подвергали предварительной бомбардировке ионами Ag с помощью ионного источника ИИ-4-015 (ионный ток 40 мА, время обработки 120 с). Распыление Si-мишени (99,999 %) диаметром 100 мм и Mo-мишени (99,95 %) диаметром 100 мм проводили индивидуально или одновременно в газовой смеси Ar и N₂. Давление Ar в процессе распыления составляло 3·10⁻³ торр, парциальное давление N₂ варьировали от 0 до 3·10⁻³ торр. Процесс распыления контролировали с помощью блоков питания Плазма-Тех ИВЭ 141, работающих в режиме стабилизации мощности с возможностью измерения текущих значений напряжения и силы тока. Мощность распыления Si-мишени варьировали в диапазоне 100–500 Вт, Mo-мишени – в диапазоне 100–1000 Вт. Соотношение мощностей распыления мишеней выбирали исходя из целевого состава фазосдвигающих слоев. Для исследуемого случая одновременного распыления двух мишеней мощность составляла 100 Вт для Mo-мишени и 500 Вт для Si-мишени.

Измерение толщины осажденных слоев осуществляли на атомно-силовом микроскопе AIST-NT SmartSPM (Россия) в полуконтактном режиме. Для этого перед нанесением пленки поверхность подложки частично маскировали, а измерения проводили на границе областей с осажденным слоем и без него после удаления маски. Скорость осаждения материала определяли с учетом времени распыления. Морфология и элементный состав нанесенных слоев исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6010 Plus/LA (Япония) с интегрированным рентгеновским энергодисперсионным детектором. Ускоряющее напряжение в процессе энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии варьировали с целью минимизации сигнала от подложки.

На начальном этапе отдельно изучали скорости осаждения Mo и Si в зависимости от давления N₂ (рис. 1). В обоих случаях скорость осаждения нелинейно снижается с увеличением концентрации азота в газовой смеси Ar + N₂. При этом в достаточно узком диапазоне парциальных давлений N₂ скорость осаждения снижается достаточно резко, а далее с его повышением скорость изменяется уже слабо, что характерно для реактивного распыления титана (Ti) и других металлов [23–27].

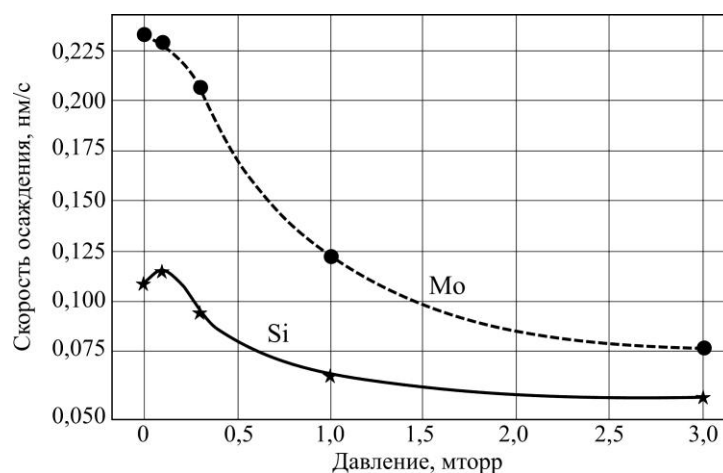


Рис. 1. Экспериментальная зависимость скорости осаждения тонких пленок Mo и Si от парциального давления N₂ в вакуумной камере в процессе реактивного ионно-плазменного распыления Mo- и Si-мишеней при электрической мощности на мишенях 1000 и 500 Вт соответственно

Fig. 1. Experimental dependence of the deposition rate of thin films of Mo and Si on the partial pressure of N₂ in the vacuum chamber during reactive ion-plasma sputtering of Mo and Si targets at electric power on the targets of 1000 and 500 W, respectively

Следующий этап – исследование влияния давления N_2 в рабочей газовой смеси $Ar + N_2$ при совместном магнетронном распылении Mo- и Si-мишеней при фиксированной электрической мощности на состав формируемой тонкой пленки Mo-Si-N-O. Зависимость изменения состава пленки Mo-Si-N-O от задаваемого парциального давления азота представлена на рис. 2. Видно, что содержание Mo и Si в пленке нелинейно снижаются, а доля (содержание) азота повышается. Причем характерно, что наиболее быстрое увеличение содержания азота происходит в интервале его давлений в вакуумной камере до 0,5 мторр, а далее изменения слабые, что согласуется с характером изменения скоростей осаждения (см. рис. 1). Это объясняется тем, что по мере увеличения парциального давления N_2 при распылении мишень постепенно покрывается нитридом, который имеет более низкий коэффициент распыления, чем соответствующий чистый материал. Очевидно, что при давлении N_2 порядка 0,5 мторр в рассматриваемом случае обе мишени уже практически полностью покрываются нитридом, что и приводит к наблюдаемым фактам: скорость осаждения пленки и содержание азота в ней при давлении более 0,5 мторр изменяются слабо, несколько уменьшаясь. При этом наблюдается плавное повышение содержания кислорода в пленке. Источником кислорода в пленке является остаточная атмосфера, т. е. это постоянный поток в вакуумную камеру, обусловленный натеканием. Таким образом, увеличение содержания кислорода в пленке также связано со снижением скорости распыления мишеней из-за их покрытия нитридом, что приводит к снижению потока атомов Mo, Si и N в пленку при практически неизменяющемся потоке атомов кислорода. Следует отметить, что при распылении мишеней чистым N_2 (при $3 \cdot 10^{-3}$ торр), несмотря на то, что парциальное давление кислорода в вакуумной камере на два порядка ниже давления азота, содержание кислорода в пленке Mo-Si-N-O оказывается в 2,5 раза выше содержания азота (см. рис. 2).

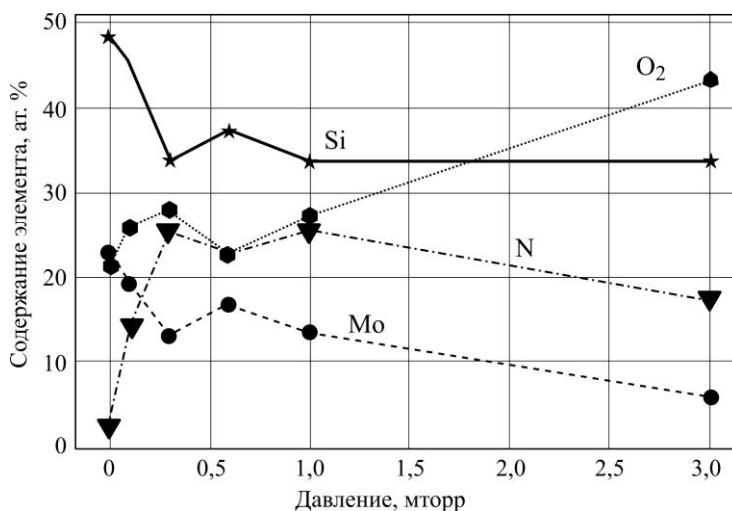


Рис. 2. Экспериментальная зависимость изменения концентрации элементов в тонкой пленке Mo-Si-N-O от парциального давления N_2 в вакуумной камере в процессе реактивного ионно-плазменного распыления Mo- и Si-мишеней при электрической мощности на мишенях 100 и 500 Вт соответственно

Fig. 2. Experimental dependence of the change of element concentrations in the Mo-Si-N-O thin film on the partial pressure of N_2 in the vacuum chamber during reactive ion-plasma sputtering of Mo and Si targets at electric power on the targets of 100 and 500 W, respectively

Расчет. Для понимания процессов, происходящих при одновременном распылении двух разных мишеней в среде химически активного газа, использовали модернизированную Мартиным и Русселотом [28] физико-математическую модель Берга и его коллег [29]. Данная модель адаптирована для рассматриваемого случая формирования тонкой пленки Mo-Si-N-O. Схема, поясняющая суть модели, показана на рис. 3.

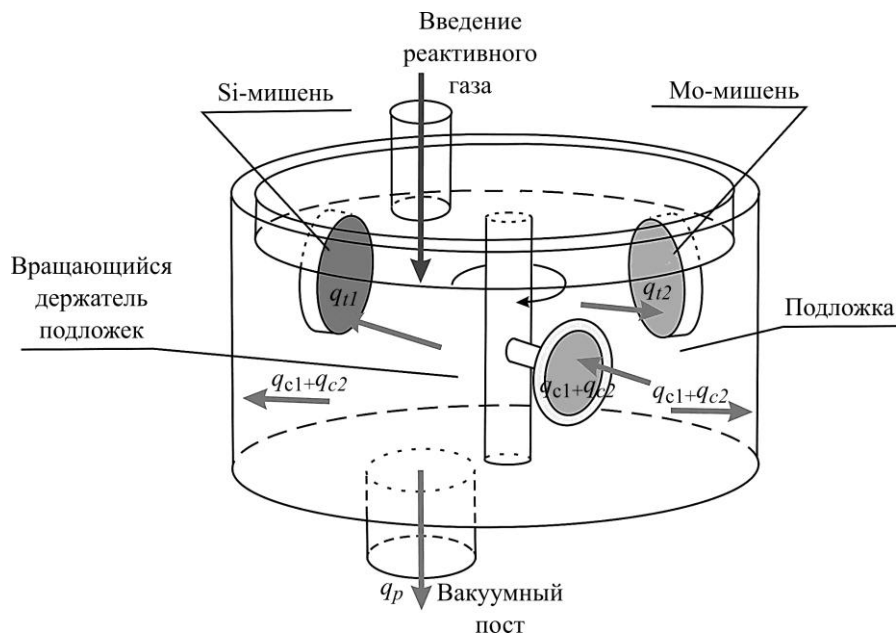


Рис. 3. Схематическое изображение модели потока реактивного газа через систему реактивного ионно-плазменного распыления

Fig. 3. Schematic representation of model of reactive gas flow through a reactive ion-plasma sputtering system (it is assumed that the chemical gas is consumed on the surfaces of Mo and Si targets, on the deposition surface of the vacuum chamber, substrates and substrate holders)

В основе модели – равенство всех входящих и всех выходящих из вакуумной установки газовых потоков химически активного газа – N_2 . Входящий поток N_2 q_0 расходуется поверхностями двух мишеней $q_{t\text{Mo}}$ и $q_{t\text{Si}}$, поверхностью осаждения, т. е. поверхностями подложки $q_{c\text{Mo}}$ и вакуумной камеры $q_{c\text{Si}}$, а оставшаяся часть N_2 откачивается вакуумным насосом – поток q_p :

$$q_0 = q_{t1} + q_{t2} + q_{c\text{Mo}} + q_{c\text{Si}} + q_p.$$

При этом Mo- и Si-мишени из-за взаимодействия с азотом частично (доли $\theta_{t\text{Mo}}$ и $\theta_{t\text{Si}}$) покрываются нитридом (рис. 4). Поэтому скорость распыления мишеней заметно снижается, так как коэффициент распыления нитрида всегда меньше, чем коэффициент распыления чистого элемента. Это является основной причиной резкой нелинейности процесса реактивного ионно-плазменного распыления. Снижение коэффициентов распыления мишеней приводит к быстрому и существенному изменению условий конденсации на поверхности осаждения (доли $\theta_{t\text{Mo}}$ и $\theta_{t\text{Si}}$) и, как следствие, к изменению состава тонкой пленки. В итоге расчет по модели, описанной в работе [28], сводится к вычислению долей $\theta_{t\text{Mo}}$, $\theta_{t\text{Si}}$, $\theta_{c\text{Mo}}$ и $\theta_{c\text{Si}}$ и выявлению причин изменения парциального давления химически активного газа в камере в зависимости от изменения условий его потребления на поверхностях распыления и осаждения и, как следствие, возникновения гистерезиса этого процесса. Дополним используемую модель расчетом состава формируемой тонкой пленки Mo-Si-N-O в атомных долях или атомных процентах.

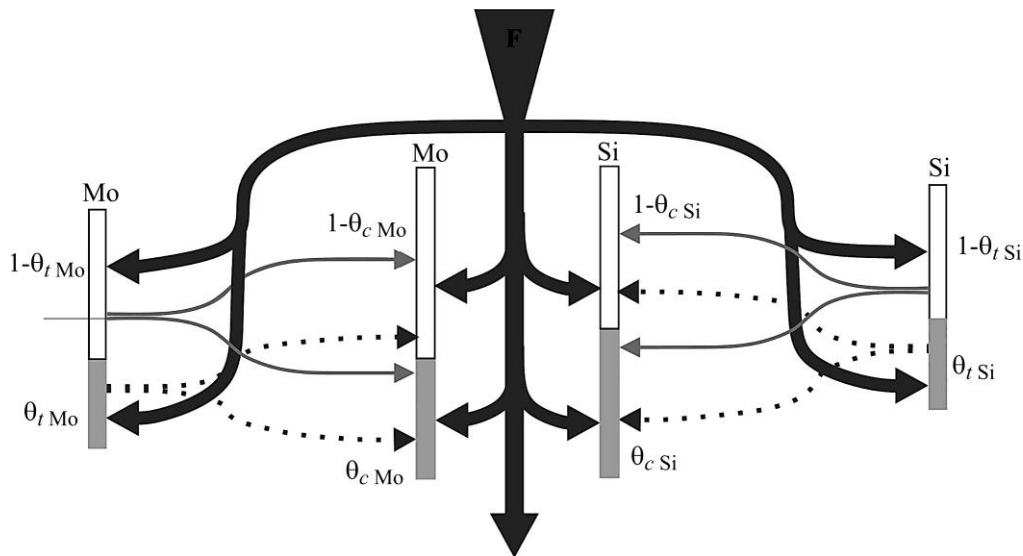


Рис. 4. Схема направления потребления потока активного газа – азота и источники поступления азота на поверхности осаждения, подложках и подложкодержателях при реактивном ионно-плазменном распылении Mo- и Si-мишеней

Fig. 4. Schematic showing the directions of active gas – nitrogen flow consumption and sources of nitrogen supply on the deposition surface, substrates and substrate holders during reactive ion-plasma sputtering of Mo and Si targets

Концентрацию компонентов C (ат. %) в получаемой пленке Mo-Si-N-O можно рассчитать из следующих соотношений:

$$C_{\text{Mo}} = \frac{N_{\text{Mo}}}{N_{\text{Mo}} + N_{\text{N}} + N_{\text{O}} + N_{\text{Si}}},$$

$$C_{\text{Si}} = \frac{N_{\text{Si}}}{N_{\text{Mo}} + N_{\text{N}} + N_{\text{O}} + N_{\text{Si}}},$$

$$C_{\text{N}} = \frac{N_{\text{N}}}{N_{\text{Mo}} + N_{\text{N}} + N_{\text{O}} + N_{\text{Si}}},$$

$$C_{\text{O}} = \frac{N_{\text{O}}}{N_{\text{Mo}} + N_{\text{N}} + N_{\text{O}} + N_{\text{Si}}},$$

где N_X – поток соответствующих атомов, формирующих тонкую пленку, т. е. количество соответствующих атомов, конденсирующихся на единице поверхности в единицу времени, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

С учетом выражений для скорости распыления мишеней для определения потока атомов Mo можно записать

$$N_{\text{Mo}} = \left[\frac{J}{e} S_{\text{MoN}} \theta_{t \text{ Mo}} + \frac{J}{e} S_{\text{Mo}} (1 - \theta_{t \text{ Mo}}) \right] \frac{A_{t \text{ Mo}}}{A_{c \text{ Mo}}},$$

где $\frac{J}{e} S_{\text{MoN}} \theta_{t \text{ Mo}}$ – количество Mo, поступающего в пленку в результате распыления нитрида молибдена MoN с мишени; $\frac{J}{e} S_{\text{Mo}} (1 - \theta_{t \text{ Mo}})$ – количество Mo, поступающего в пленку в результате распыления свободного Mo с мишени.

Аналогичное выражение можно записать для атомов Si, поступающих в пленку в единицу времени на единицу площади:

$$N_{Si} = \left[\frac{J}{e} S_{SiN} \theta_{tSi} + \frac{J}{e} S_{Si} (1 - \theta_{tSi}) \right] \frac{A_{tSi}}{A_{cSi}}.$$

Выражение для удельной скорости осаждения азота будет иметь вид

$$N_{Si} = \frac{J}{e} S_{MoN} \theta_{tMo} \frac{A_{tMo}}{A_{cMo}} + \frac{J}{e} S_{SiN} \theta_{tSi} \frac{A_{tSi}}{A_{cSi}} + \alpha_{cMo} F(1 - \theta_{cMo}) + \alpha_{cSi} F(1 - \theta_{cSi}) + \\ + \alpha_{cMoN} F \theta_{tMo} + \alpha_{cSiN} F \theta_{tSi},$$

где $\frac{J}{e} S_{MoN} \theta_{tMo} \frac{A_{tMo}}{A_{cMo}}$ – количество азота, поступающего в пленку в результате распыле-

ния MoN с мишени; $\frac{J}{e} S_{SiN} \theta_{tSi} \frac{A_{tSi}}{A_{cSi}}$ – количество азота, поступающего в пленку в ре-

зультате распыления нитрида кремния с мишени; $\alpha_{cMo} F(1 - \theta_{cMo})$ – количество азота, поступающего в пленку в результате его поглощения свободным Mo на поверхности осаждения A_{cMo} ; $\alpha_{cSi} F(1 - \theta_{cSi})$ – количество азота, поступающего в пленку в результате его поглощения свободным Si на поверхности осаждения A_{cSi} ; $\alpha_{cMoN} F \theta_{tMo}$ – количество азота, поступающего в пленку в результате его физической адсорбции фракцией MoN на поверхности осаждения; α_{cNMo} – коэффициент аккомодации атомов азота к MoN; $\alpha_{cSiN} F \theta_{tSi}$ – количество азота, поступающего в пленку в результате его физической адсорбции фракцией нитрида кремния на поверхности осаждения; α_{cNSi} – коэффициент аккомодации атомов азота к нитриду кремния.

При проведении эксперимента O_2 специальным отдельным потоком не вводили. Источником появления кислорода в пленке является остаточная газовая атмосфера. Учитывая, что Mo и Si обладают сильным геттерным эффектом по отношению к O_2 , можно принять, что поток O_2 потребляется поверхностями мишеней, долей поверхности осаждения, покрытой чистыми Mo и Si, и в меньшей степени долей поверхности, покрытой нитридом молибдена и нитридом кремния. Для упрощения вычислений можно пренебречь кислородом, который поступает с мишеней в результате распыления оксида. Это возможно, поскольку вклад его в пленку невелик по сравнению с кислородом, поступающим на поверхность осаждения непосредственно из газовой среды вакуумной камеры, парциальное давление N_2 намного превосходит давление O_2 , а коэффициент распыления оксида еще меньше, чем у нитрида. В результате для потока O_2 в формируемую пленку можно записать

$$N_O = F_O (1 - \alpha_{tMoO_2} (1 - \theta_{tMo})) (\alpha_{cMoO_2} (1 - \theta_{cMo})) + \\ + F_O (1 - \alpha_{tMoO_2} (1 - \theta_{tMo})) (\alpha_{cMoNO_2} (1 - \theta_{cMo})) + \\ + F_O (1 - \alpha_{tSiO_2} (1 - \theta_{tSi})) (\alpha_{cSiO_2} (1 - \theta_{cSi})) + \\ + F_O (1 - \alpha_{tSiO_2} (1 - \theta_{tSi})) (\alpha_{cSiNO_2} (1 - \theta_{cSi})), \\ F_O = \frac{D_O P_{ост}}{\sqrt{2\pi k T M_O}},$$

где F_O – поток O_2 ; D_O – доля кислорода в остаточной атмосфере; $P_{ост}$ – давление остаточных газов в вакуумной камере; M_O – молекулярная масса O_2 .

На основе представленного модельного подхода написана компьютерная программа на языке Python и проведены теоретические расчеты состава пленок Mo-Si-N-O, которые сопоставлены с полученными экспериментальными данными. Основные параметры для расчетов состава пленки Mo-Si-N-O, формируемой при одновременном ионно-плазменном распылении Mo- и Si-мишеней в газовой среде N₂, и их значения следующие:

Площадь Si-мишени.....	0,004 м ²
Площадь Mo-мишени.....	0,004 м ²
Площадь поверхности осаждения камеры и подложек для Si и Si ₃ N ₄	0,3 м ²
Площадь поверхности осаждения камеры и подложек для Mo и MoN.....	0,3 м ²
Коэффициент распыления Si для E (Ar ⁺) = 400 эВ.....	0,9
Коэффициент распыления SiN для E (Ar ⁺) = 400 эВ.....	0,3
Коэффициент распыления Mo для E (Ar ⁺) = 400 эВ.....	0,9
Коэффициент распыления MoN для E (Ar ⁺) = 400 эВ.....	0,3
Скорость откачки.....	1200 л/с
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности Si-мишени.....	0,1
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности Si ₃ N ₄ -мишени.....	0,00001
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности осаждения, покрытой Si.....	0,005
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности осаждения, покрытой Si ₃ N ₄	0,00002
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности Mo-мишени.....	0,6
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности MoN-мишени.....	0,00001
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности осаждения, покрытой Mo.....	0,01
Коэффициент аккомодации молекулы N ₂ на поверхности осаждения, покрытой MoN.....	0,000002
Коэффициент аккомодации молекулы O ₂ на поверхности осаждения, покрытой Si.....	0,15
Коэффициент аккомодации молекулы O ₂ на поверхности осаждения, покрытой Si ₃ N ₄	0,13
Коэффициент аккомодации молекулы O ₂ на поверхности осаждения, покрытой Mo.....	0,01
Коэффициент аккомодации молекулы O ₂ на поверхности осаждения, покрытой MoN.....	0,09
Температура.....	273 К
Плотность ионного тока Si-мишени.....	165 А/м ²
Плотность ионного тока Mo-мишени.....	85 А/м ²

Рис. 5 демонстрирует результаты теоретического расчета концентрации элементов в формируемой тонкой пленке Mo-Si-N-O в зависимости от парциального давления N₂ при реактивном магнетронном распылении Mo- и Si-мишеней. Видно, что расчетные кривые согласуются с данными экспериментальных исследований. Полученные экспериментальные результаты показывают, что в условиях нитридации распыляемых Mo- и Si-мишеней, резкого падения коэффициентов их распыления из-за этого и, как следствие, соответствующего падения скорости осаждения пленки заметно увеличивается содержание в ней кислорода. Эксперименты, проведенные при давлении остаточных газов 7·10⁻⁵ торр, показывают неприемлемо высокое содержание кислорода в пленке (от 25 до 40 ат. %). В то же время моделирование данного процесса с использованием предложенного подхода показывает, что снижение остаточного атмосферного давления до 1·10⁻⁵ торр позволяет снизить содержание кислорода в пленке Mo-Si-N-O до 4–8 ат. % (рис. 6).

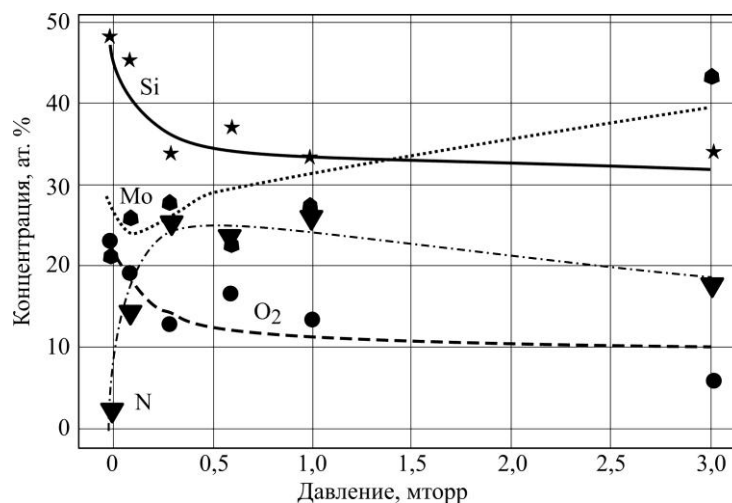


Рис. 5. Зависимость концентрации элементов в тонкой пленке Mo-Si-N-O от парциального давления N_2 в вакуумной камере в процессе реактивного ионно-плазменного распыления Mo- и Si-мишеней при электрической мощности на мишенях 100 и 500 Вт соответственно: кривые – расчет; условные обозначения – эксперимент

Fig. 5. Dependence of element concentrations in Mo-Si-N-O thin film as a function of N_2 partial pressure in the vacuum chamber during reactive ion-plasma sputtering of Mo and Si targets at electric power on the targets of 100 and 500 W, respectively: curves – calculation; symbols – experiment

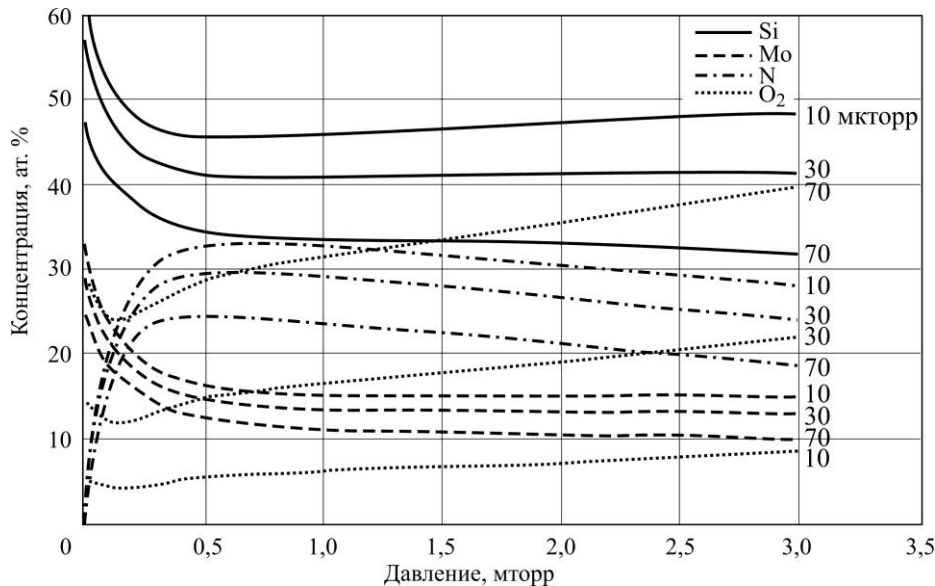


Рис. 6. Расчетная зависимость изменения концентрации элементов в тонкой пленке Mo-Si-N-O от парциального давления N_2 в вакуумной камере в процессе реактивного ионно-плазменного распыления Mo- и Si-мишеней при различных давлениях остаточной атмосферы

Fig. 6. Calculated dependence of changes in element concentrations in a Mo-Si-N-O thin film as a function of N_2 partial pressure in a vacuum chamber during reactive ion-plasma sputtering of Mo and Si targets at different pressures of the residual atmosphere

Другие важные параметры, которые позволяют широко варьировать состав тонкой пленки, – это плотности ионных токов J на мишенях. Результаты прогнозирования состава пленок Mo-Si-N-O при изменении плотности ионных токов на мишенях показаны на рис. 7. Изменение плотностей ионных токов на Mo- и Si-мишенях позволяет в широком диапазоне варьировать соотношение Mo и Si.

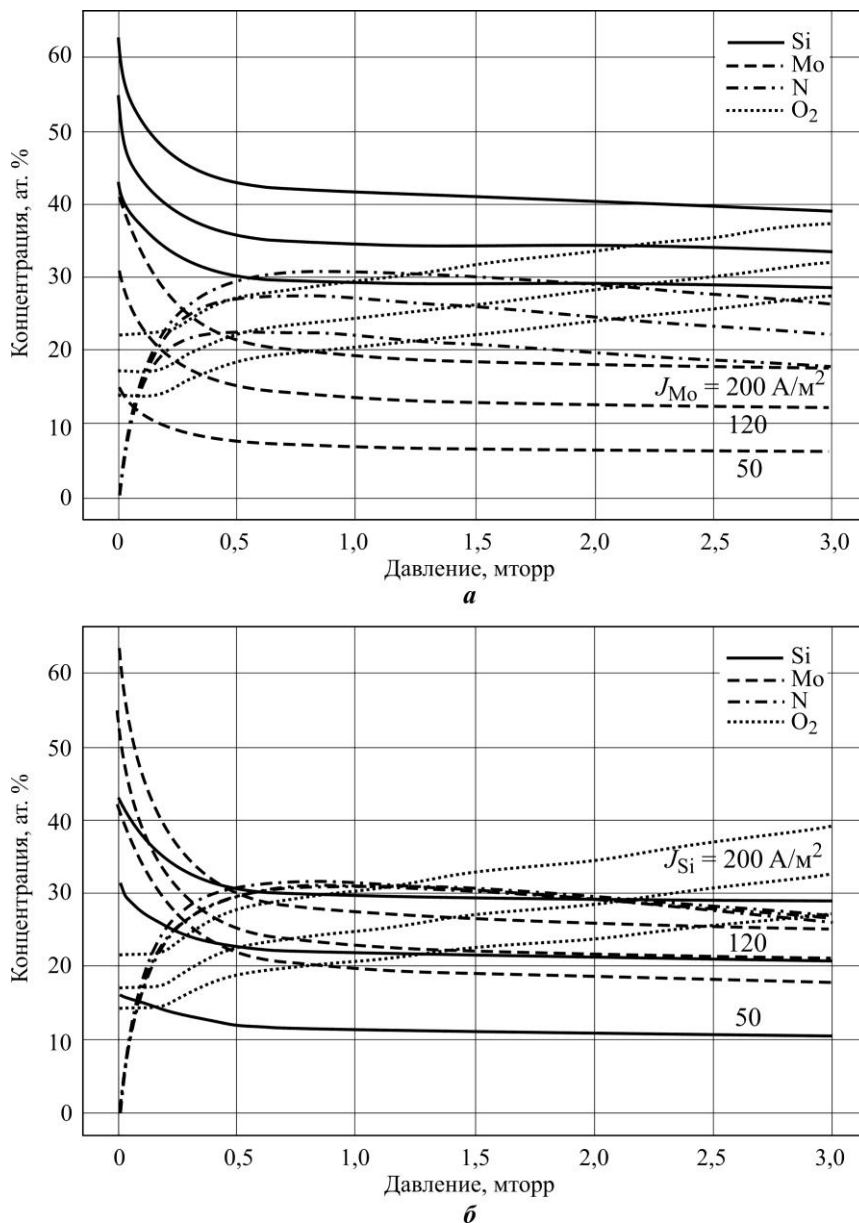


Рис. 7. Расчетные зависимости изменения концентрации элементов в тонкой пленке Mo-Si-N-O от парциального давления N_2 в вакуумной камере в процессе реактивного ионно-плазменного распыления Mo- и Si-мишеней при различных плотностях ионного тока на Mo-мишени J_{Mo} при $J_{Si} = 165 \text{ A/m}^2$ (а) и на Si-мишени J_{Si} при $J_{Mo} = 85 \text{ A/m}^2$ (б)
 Fig. 7. Calculated dependences of element concentrations in the Mo-Si-N-O thin film as a function of N_2 partial pressure in the vacuum chamber during reactive ion-plasma sputtering of Mo and Si targets at different ion current densities on Mo target J_{Mo} at $J_{Si} = 165 \text{ A/m}^2$ (a) and on Si target J_{Si} at $J_{Mo} = 85 \text{ A/m}^2$ (b)

Заключение. Сопоставление теоретического расчета с экспериментальными данными позволило подобрать задаваемые параметры процесса ионно-плазменного нанесения тонких пленок сложной многокомпонентной системы Mo-Si-N-O. Задавая условия осаждения, можно прогнозировать состав формируемой пленки. Наиболее динамичным диапазоном парциального давления N₂, при котором изменяется состав пленки Mo-Si-N-O, требующий особого контроля, является 0–0,5 мторр. Результаты проведенного исследования могут быть полезны при разработке оптимальных составов фазосдвигающих слоев фотошаблонов.

Литература

1. *Sproul W. D., Graham M. E., Wong M.-S., Rudnik P. J.* Reactive d.c. magnetron sputtering of the oxides of Ti, Zr, and Hf // *Surf. Coat. Technol.* 1997. Vol. 89. Iss. 1-2. P. 10–15. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)02913-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02913-1)
2. *Ellmer K., Welzel T.* Reactive magnetron sputtering of transparent conductive oxide thin films: Role of energetic particle (ion) bombardment // *Journal of Materials Research.* 2012. Vol. 27. Iss. 5. P. 765–779. <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.428>
3. *Iqbal A., Mohd-Yasin F.* Reactive sputtering of aluminum nitride (002) thin films for piezoelectric applications: A review // *Sensors.* 2018. Vol. 18. Iss. 6. Art. No. 1797. <https://doi.org/10.3390/s18061797>
4. Magnetron sputtering of transition metal nitride thin films for environmental remediation / *L. Aissani, A. Alhussein, A. W. Zia et al.* // *Coatings.* 2022. Vol. 12. Iss. 11. Art. No. 1746. <https://doi.org/10.3390/coatings12111746>
5. *Abdelhameed A. H., Jacob W.* Deposition of thermally stable tungsten nitride thin films by reactive magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 2019. Vol. 375. P. 701–707. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.046>
6. *Бойцова Е. Л., Леонова Л. А.* Исследование свойств тонких пленок Ti-O-N, осажденных методом реактивного магнетронного напыления // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 82. № 9. С. 1257–1262. <https://doi.org/10.1134/S0367676518090053>. – EDN: XWVMNV.
7. *Bartzsch H., Lange S., Frach P., Goedicke K.* Graded refractive index layer systems for antireflective coatings and rugate filters deposited by reactive pulse magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 2004. Vol. 180–181. P. 616–620. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.105>
8. Effect of carbon content on structural, mechanical and tribological properties of Cr-V-C-N coatings / *L. Aissani, A. Alhussein, A. Belgroune et al.* // *Thin Solid Films.* 2021. Vol. 732. Art. No. 138782. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138782>
9. Design, testing and characterization of innovative TiN-TiO₂ surfaces inactivating bacteria under low intensity visible light / *S. Rtimi, O. Baghriche, C. Pulgarin et al.* // *RSC Adv.* 2012. Vol. 2. Iss. 23. P. 8591–8595. <https://doi.org/10.1039/C2RA20559A>
10. Reactive magnetron sputtering of TiO_x films / *P. Baroch, J. Musil, J. Vlcek et al.* // *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 193. Iss. 1–3. P. 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.060>
11. *Jiang N., Georgiev D. G., Jayatissa A. H.* The effects of the pressure and the oxygen content of the sputtering gas on the structure and the properties of zinc oxy-nitride thin films deposited by reactive sputtering of zinc // *Semicond. Sci. Technol.* 2013. Vol. 28. No. 2. Art. No. 025009. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/2/025009>
12. Wide variation in the structure and physical properties of reactively sputtered (TiZrHf)N coatings under different working pressures / *D.-C. Tsai, Z.-C. Chang, B.-H. Kuo et al.* // *Journal of Alloys and Compounds.* 2018. Vol. 750. P. 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.011>
13. Multitarget reactive magnetron sputtering towards the production of strontium molybdate thin films / *M. Andrulevičius, E. Artiukh, G. Suchanek et al.* // *Materials.* 2023. Vol. 16. Iss. 6. Art. No. 2175. <https://doi.org/10.3390/ma16062175>
14. *Pilko V. V., Komarov F. F.* Structure and tribomechanical properties of TiZrSiN nanostructured thin films deposited by reactive magnetron sputtering // *Journal of Advanced Materials and Technologies.* 2018. No. 1. P. 14–21. EDN: LYBSMX.
15. Influence of N₂ gas flow ratio and working pressure on amorphous Mo-Si-N coating during magnetron sputtering / *K. S. Lim, Y. S. Kim, S. H. Hong et al.* // *Coatings.* 2020. Vol. 10. Iss. 1. Art. No. 34. <https://doi.org/10.3390/coatings10010034>

16. *Liu Y.-C., Liang B.-H., Huang C.-R., Wu F.-B.* Microstructure evolution and mechanical behavior of Mo-Si-N films // *Coatings*. 2020. Vol. 10. Iss. 10. Art. No. 987. <https://doi.org/10.3390/coatings10100987>
17. Syntheses and mechanical properties of Mo-Si-N coatings by a hybrid coating system / *S. J. Heo, K. H. Kim, M. C. Kang et al.* // *Surf. Coat. Technol.* 2006. Vol. 201. Iss. 7. P. 4180–4184. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.048>
18. *Yang Q., Zhao L. R., Patnaik P. C., Zeng X. T.* Wear resistant TiMoN coatings deposited by magnetron sputtering // *Wear*. 2006. Vol. 261. Iss. 2. P. 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.07.008>
19. *Suszko T., Gulbiński W., Jagielski J.* The role of surface oxidation in friction processes on molybdenum nitride thin films // *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 194. Iss. 2-3. P. 319–324. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.119>
20. *Levenson M. D., Viswanathan N. S., Simpson R. A.* Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1982. Vol. 29. No. 12. P. 1828–1836. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1982.21037>
21. Evaluation of molybdenum silicide for use as a 193-nm phase-shifting absorber in photomask manufacturing / *M. S. Hibbs, M. Ushida, K. Babich et al.* // *Proc. SPIE. 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology*. 2001. Vol. 4186. P. 444–451. <https://doi.org/10.1117/12.410721>
22. *Ushida M., Kobayashi H.* HOYA deep-UV EAPSM blanks development status // *Proc. SPIE. 15th European Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Microcomponents'98*. 1999. Vol. 3665. Art. ID: 346216. <https://doi.org/10.1117/12.346216>
23. *Сейдман Л. А.* Реактивное нанесение в вакууме слоев нитрида титана и применение их в системе контактной металлизации полупроводниковых приборов (по данным отечественной и зарубежной печати за 1975–1987 гг.). М.: ЦНИИ «Электроника», 1988. 60 с.
24. *Сейдман Л. А.* Получение пленок нитрида титана реактивным магнетронным распылением // *Электрон. техника. Сер. 2: Полупроводниковые приборы*. 1985. Вып. 2 (175). С. 69–75.
25. Preparation and characterization of CrN thin film by DC reactive magnetron sputtering / *W. Siriprom, C. Chananonwathorn, S. Kongsriprapan et al.* // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. Iss. 7. P. 15224–15227. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.087>
26. *Anitha V. P., Major S., Chandrasekharam D., Bhatnagar M.* Deposition of molybdenum nitride thin films by r.f. reactive magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 1996. Vol. 79. Iss. 1–3. P. 50–54. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02425-5](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02425-5)
27. Reactive sputter deposition and properties of Ta_xN thin films / *T. Riekkinen, J. Molarius, T. Laurila et al.* // *Microelectronic Engineering*. 2002. Vol. 64. Iss. 1–4. P. 289–297. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(02\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(02)00801-8)
28. *Martin N., Rousselot C.* Modelling of reactive sputtering processes involving two separated metallic targets // *Surf. Coat. Technol.* 1999. Vol. 114. Iss. 2-3. P. 235–249. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00051-1)
29. *Berg S., Blom H.-O., Larsson T., Nender C.* Modeling of reactive sputtering of compound materials // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1987. Vol. 5. Iss. 2. P. 202–207. <https://doi.org/10.1116/1.574104>

Статья поступила в редакцию 13.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 25.09.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

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

Гаврилов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, директор Института перспективных материалов и технологий, директор Центра компетенций национальной технологической инициативы «Сенсорика» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pcfme@miee.ru

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

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

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

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

Поголов Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dtm@miee.ru

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

Бутманов Данил Денисович – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), butmanovdanil@yandex.ru

Ширяев Максим Евгеньевич – студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), shiryaevme@bk.ru

Громов Владислав Дмитриевич – лаборант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), grovla2002@mail.ru

Рязанов Роман Михайлович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), r.m.ryazanov@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

Беспалов Владимир Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, ректор Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), netadm@miee.ru

References

1. Sproul W. D., Graham M. E., Wong M.-S., Rudnik P. J. Reactive d.c. magnetron sputtering of the oxides of Ti, Zr, and Hf. *Surf. Coat. Technol.*, 1997, vol. 89, iss. 1-2, pp. 10–15. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)02913-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02913-1)
2. Ellmer K., Welzel T. Reactive magnetron sputtering of transparent conductive oxide thin films: Role of energetic particle (ion) bombardment. *Journal of Materials Research*, 2012, vol. 27, iss. 5, pp. 765–779. <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.428>
3. Iqbal A., Mohd-Yasin F. Reactive sputtering of aluminum nitride (002) thin films for piezoelectric applications: A review. *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 6, art. no. 1797. <https://doi.org/10.3390/s18061797>
4. Aissani L., Alhoussein A., Zia A. W., Mamba G., Rtimi S. Magnetron sputtering of transition metal nitride thin films for environmental remediation. *Coatings*, 2022, vol. 12, iss. 11, art. no. 1746. <https://doi.org/10.3390/coatings12111746>
5. Abdelhameed A. H., Jacob W. Deposition of thermally stable tungsten nitride thin films by reactive magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2019, vol. 375, pp. 701–707. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.046>
6. Boytsova E. L., Leonova L. A. Investigating thin Ti-O-N films deposited via reactive magnetron sputtering. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2018, vol. 82, iss. 9, pp. 1143–1147. <https://doi.org/10.3103/S1062873818090058>
7. Bartzsch H., Lange S., Frach P., Goedicke K. Graded refractive index layer systems for antireflective coatings and rugate filters deposited by reactive pulse magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2004, vol. 180-181, pp. 616–620. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.105>
8. Aissani L., Alhoussein A., Belgroune A., Nouveau C., Zgheib E., Barille R., Montagne A. Effect of carbon content on structural, mechanical and tribological properties of Cr-V-C-N coatings. *Thin Solid Films*, 2021, vol. 732, art. no. 138782. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138782>
9. Rtimi S., Baghrich O., Pulgarin C., Sanjines R., Kiwi J. Design, testing and characterization of innovative TiN-TiO₂ surfaces inactivating bacteria under low intensity visible light. *RSC Adv.*, 2012, vol. 2, iss. 23, pp. 8591–8595. <https://doi.org/10.1039/C2RA20559A>
10. Baroch P., Musil J., Vlcek J., Nam K. H., Han J. G. Reactive magnetron sputtering of TiO_x films. *Surf. Coat. Technol.*, 2005, vol. 193, iss. 1–3, pp. 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.060>
11. Jiang N., Georgiev D. G., Jayatissa A. H. The effects of the pressure and the oxygen content of the sputtering gas on the structure and the properties of zinc oxy-nitride thin films deposited by reactive sputtering of zinc. *Semicond. Sci. Technol.*, 2013, vol. 28, no. 2, art. no. 025009. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/2/025009>
12. Tsai D.-C., Chang Z.-C., Kuo B.-H., Chen B.-C., Chen E.-C., Shieu F.-S. Wide variation in the structure and physical properties of reactively sputtered (TiZrHf)N coatings under different working pressures. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 750, pp. 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.011>
13. Andrulevičius M., Artiukh E., Suchanek G., Wang S., Sobolev N. A., Gerlach G., Tamulevičienė A., Abakevičienė B., Tamulevičius S. Multitarget reactive magnetron sputtering towards the production of strontium molybdate thin films. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 6, art. no. 2175. <https://doi.org/10.3390/ma16062175>
14. Pilko V. V., Komarov F. F. Structure and tribomechanical properties of TiZrSiN nanostructured thin films deposited by reactive magnetron sputtering. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2018, no. 1, pp. 14–21. EDN: LYBSMX.
15. Lim K. S., Kim Y. S., Hong S. H., Song G., Kim K. B. Influence of N₂ gas flow ratio and working pressure on amorphous Mo-Si-N coating during magnetron sputtering. *Coatings*, 2020, vol. 10, iss. 1, art. no. 34. <https://doi.org/10.3390/coatings10010034>
16. Liu Y.-C., Liang B.-H., Huang C.-R., Wu F.-B. Microstructure evolution and mechanical behavior of Mo-Si-N films. *Coatings*, 2020, vol. 10, iss. 10, art. no. 987. <https://doi.org/10.3390/coatings10100987>
17. Heo S. J., Kim K. H., Kang M. C., Suh J. H., Park C.-G. Syntheses and mechanical properties of Mo-Si-N coatings by a hybrid coating system. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, vol. 201, iss. 7, pp. 4180–4184. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.048>
18. Yang Q., Zhao L. R., Patnaik P. C., Zeng X. T. Wear resistant TiMoN coatings deposited by magnetron sputtering. *Wear*, 2006, vol. 261, iss. 2, pp. 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.07.008>
19. Suszko T., Gulbiński W., Jagielski J. The role of surface oxidation in friction processes on molybdenum nitride thin films. *Surf. Coat. Technol.*, 2005, vol. 194, iss. 2-3, pp. 319–324. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.119>

20. Levenson M. D., Viswanathan N. S., Simpson R. A. Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1982, vol. 29, no. 12, pp. 1828–1836. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1982.21037>
21. Hibbs M. S., Ushida M., Babich K., Mitsui H., Bourov A. Evaluation of molybdenum silicide for use as a 193-nm phase-shifting absorber in photomask manufacturing. *Proc. SPIE. 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology*, 2001, vol. 4186, pp. 444–451. <https://doi.org/10.1117/12.410721>
22. Ushida M., Kobayashi H. HOYA deep-UV EAPSM blanks development status. *Proc. SPIE. 15th European Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Microcomponents'98*, 1999, vol. 3665, art. ID: 346216. <https://doi.org/10.1117/12.346216>
23. Seydman L. A. *Reactive vacuum deposition of titanium nitride coatings and their application in contact plating system of semiconductor devices (according to Russian and foreign press in the years 1975 to 1987)*. Moscow, TsNII “Elektronika”, 1988. 60 p. (In Russian).
24. Seydman L. A. Titanium nitride films obtained by reactive magnetron sputtering. *Elektron. tekhnika. Ser. 2: Poluprovodnikovye pribory*, 1985, iss. 2 (175), pp. 69–75. (In Russian).
25. Siriprom W., Chananonwathorn C., Kongsriprapan S., Teanchai K., Herman, Horprathum M. Preparation and characterization of CrN thin film by DC reactive magnetron sputtering. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 7, pp. 15224–15227. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.087>
26. Anitha V. P., Major S., Chandrasekharam D., Bhatnagar M. Deposition of molybdenum nitride thin films by r.f. reactive magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 1996, vol. 79, iss. 1–3, pp. 50–54. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02425-5](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02425-5)
27. Riekkinen T., Molarius J., Laurila T., Nurmela A., Suni I., Kivilahti J. K. Reactive sputter deposition and properties of Ta_xN thin films. *Microelectronic Engineering*, 2002, vol. 64, iss. 1–4, pp. 289–297. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(02\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(02)00801-8)
28. Martin N., Rousselot C. Modelling of reactive sputtering processes involving two separated metallic targets. *Surf. Coat. Technol.*, 1999, vol. 114, iss. 2-3, pp. 235–249. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00051-1)
29. Berg S., Blom H.-O., Larsson T., Nender C. Modeling of reactive sputtering of compound materials. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1987, vol. 5, iss. 2, pp. 202–207. <https://doi.org/10.1116/1.574104>

The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 25.09.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

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

Sergey A. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Advanced Materials and Technologies, Director of the Competence Center of the National Technological Initiative “Sensorics”, Vice-Rector for Research, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pcfme@miee.ru

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

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

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

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

Anatoly I. Pogalov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Engineering, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dtm@miee.ru

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

Danil D. Butmanov – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), butmanovdanil@yandex.ru

Maxim E. Shiryayev – Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), shiryayevme@bk.ru

Vladislav D. Gromov – Laboratory Assistant of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), grovla2002@mail.ru

Roman M. Ryazanov – Junior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), r.m.ryazanov@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

Vladimir A. Bespalov – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), netadm@miee.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья

УДК 62-95

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-6-762-772

EDN: VNJRQE

Исследование и разработка процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния со сниженной шероховатостью боковых стенок структур

*А. А. Голишников¹, Н. А. Дюжев¹, В. В. Парамонов¹, И. В. Потапенко^{1,2},
М. Г. Путря¹, Н. М. Сомов^{1,2}, Ю. А. Чаплыгин¹*

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

г. Москва, Россия

²НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

dsd@miee.ru

Аннотация. В производстве микро- и нанoeлектронных устройств для глубокого анизотропного плазменного травления кремния при формировании щелевых структур в настоящее время широко используется Bosch-процесс. Однако гребешковые неровности (скэллопы), образующиеся в процессе травления на боковой стенке формируемой структуры, могут существенно ухудшать характеристики создаваемого конечного изделия, например нанofотонных структур. В работе предложен простой и эффективный метод уменьшения высоты гребней на боковых поверхностях формируемых структур. Для достижения результата проведено исследование влияния параметров Bosch-процесса на профиль и микроморфологию стенок формируемых структур. В частности, исследовано влияние соотношения времен стадий травления и пассивации, ВЧ-мощности смещения на электроде-подложкодержателе, давления и скорости газовых потоков используемых газов на линейные размеры скэллопов. Влияние операционных параметров на геометрию скэллопов на боковых стенках структур оценено по измеренным значениям глубины и длины гребней для каждой совокупности операционных параметров. Проведенные исследования позволили разработать процесс формирования структур с уменьшенной на 65 % глубиной и на 43 % длиной гребней на их боковых поверхностях. Описываемый в работе метод сглаживания боковых стенок пригоден для широкого применения в микрообработке кремния для изделий фотоники, микро- и нанoeлектроники.

Ключевые слова: глубокое анизотропное плазменное травление кремния, Bosch-процесс, шероховатость боковых стенок, скэллопы, источник индуктивно-связанной плазмы

© А. А. Голишников, Н. А. Дюжев, В. В. Парамонов, И. В. Потапенко, М. Г. Путря, Н. М. Сомов, Ю. А. Чаплыгин, 2023

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-29-00189).

Для цитирования: Исследование и разработка процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния со сниженной шероховатостью боковых стенок структур / А. А. Голишников, Н. А. Дюжев, В. В. Парамонов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 762–772. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-762-772>. – EDN: VNJRQE.

Original article

Research and development of the deep anisotropic silicon plasma etching process with reduced sidewall roughness of the structures

A. A. Golishnikov¹, N. A. Dyuzhev¹, V. V. Paramonov¹, I. V. Potapenko^{1,2},
M. G. Putrya¹, N. M. Somov^{1,2}, Yu. A. Chaplygin¹

¹National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia

²SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia

dsd@miee.ru

Abstract. In the production of micro- and nanoelectronic devices for silicon deep reactive ion etching, the Bosch process is widely used in the formation of trench structures. However, scallop irregularities formed during etching on the sidewall of the formed structure can significantly impair the characteristics of the final product being created, for example nanophotonic structures. In this work, a simple and effective method for reducing the scallops height on the structures side surfaces is proposed. To achieve the result, the impact of the Bosch process parameters on the profile and structures walls micromorphology was studied. In particular, the impact of the etching and passivation times ratio, bias RF power on the electrode, pressure and gas flow velocities was researched. Structures sidewalls scallops geometry was estimated from the measured values of the scallops’ depth and length for each operational parameters sets. The research has made it possible to develop a process to form structures with a 65 % reduced scallops depth and a 43 % reduced scallops length on their side surfaces. The side wall smoothing method described in this work is suitable for broad applicability in silicon micromachining for a wide range of photonics, micro- and nanoelectronics products.

Keywords: deep anisotropic plasma silicon etching, Bosch process, sidewall roughness, scallops, inductively coupled plasma source

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-29-00189).

For citation: Golishnikov A. A., Dyuzhev N. A., Paramonov V. V., Potapenko I. V., Putrya M. G., Somov N. M., Chaplygin Yu. A. Research and development of the deep anisotropic silicon plasma etching process with reduced sidewall roughness of the structures. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 762–772. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-762-772>. – EDN: VNJRQE.

Введение. На сегодняшний день Bosch-процесс является одним из основных методов глубокого анизотропного плазменного травления (ГАПТ) кремния с высокими значениями аспектного отношения и селективности к маскирующим материалам из фоторезиста и диоксида кремния [1–3]. Процесс предусматривает чередование стадий изотропного плазменного травления и пассивации, что приводит к образованию на боковых стенках формируемой структуры гребешковых неровностей (скэллопов). Данный недостаток Bosch-процесса может снизить надежность и ухудшить электрофизические параметры создаваемых электронных, МЭМС- и фотонных устройств [4]. Например, при изготовлении траншейных МОП-транзисторов чрезмерная шероховатость боковых стенок может вызвать увеличенный ток утечки и замедлить быстродействие устройства [5]. Образование скэллопов часто критично для МЭМС-устройств микрофлюидики [6], что требует минимизации шероховатости боковых стенок формируемых структур. Для устранения скэллопов, образовавшихся в результате Bosch-процесса, используют следующую за травлением жидкостную полировку поверхности в таких растворах, как КОН или ТМАН [7]. Однако это приводит к усложнению технологического маршрута и не во всех случаях дает желаемый результат [8].

В настоящей работе решается задача минимизации шероховатости боковых стенок структур непосредственно во время Bosch-процесса. При этом обеспечиваются требуемая вертикальность профиля травления с углом наклона стенок $(89 \pm 1)^\circ$ и высокая равномерность травления (свыше 95 %).

Методика эксперимента. Для ГАПТ кремния использовали установку плазмохимического травления SI 500 PTSA Plasma Etcher (SENTECH Instruments, Германия), с помощью которой реализуется Bosch-процесс. Рабочая камера установки оснащена источником высокоплотной индуктивно-связанной плазмы (ИСП). Схема реактора установки представлена на рис. 1.

Экспериментальными образцами служили пластины монокристаллического кремния КЭФ-4,5 (100) диаметром 100 мм, толщиной 470 мкм. Травление структур на глубину до 120 мкм проводили через маску задубленного при температуре 120°C в течение 10 мин фоторезиста Rohm Raas S1813 Sp15 толщиной 4,5 мкм с топологическим рисунком в виде окружностей диаметром 5 мм. При этом суммарная площадь травления кремния составляла порядка 65 % от площади пластины.

Для ГАПТ кремния выбран улучшенный Bosch-процесс, представляющий собой чередующиеся стадии травления и пассивации. На стадии травления шаги депассивации полимера с горизонтальной поверхности структуры и травления кремния объединены [9].

При проведении исследований процесса ГАПТ кремния на стадии травления варьировали время шага травления $t_{\text{тр}}$ в диапазоне от 3 до 9 с, давление $P_{\text{тр}}$ от 3 до 7 Па, расход кислорода Q_{O_2} от 0 до 20 см³/мин, ВЧ-мощность смещения на столике-подложкодержателе $W_{\text{см}}$ от 5 до 30 Вт. Другие

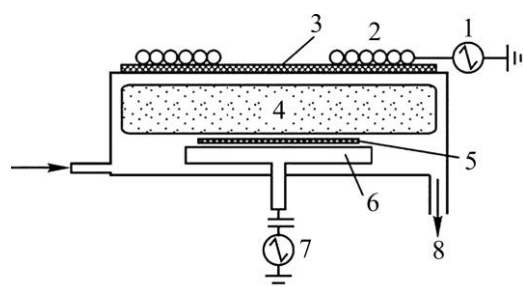


Рис. 1. Схематичное изображение реактора высокоплотной индуктивно-связанной плазмы: 1 – генератор ВЧ-мощности; 2 – индуктор; 3 – электростатический экран; 4 – плазма; 5 – подложка; 6 – подложкодержатель; 7 – генератор ВЧ-мощности для смещения подложки; 8 – откачка

Fig. 1. Schematic representation of a high-density inductively coupled plasma reactor: 1 – RF power generator; 2 – inductor; 3 – electrostatic screen; 4 – plasma; 5 – substrate; 6 – substrate holder; 7 – RF power generator for substrate displacement; 8 – pumping out

операционные характеристики шага травления оставались постоянными: расход элегаза $Q_{SF_6} = 250 \text{ см}^3/\text{мин}$, подаваемая на индуктор ВЧ-мощность $W_{ИСП} = 800 \text{ Вт}$, расход аргона $Q_{Ar} = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$. На стадии пассивации режим обработки не меняли: подаваемая на индуктор ВЧ-мощность $W_{ИСП\ пас} = 800 \text{ Вт}$, расход хладона-318 $Q_{C_4F_8} = 160 \text{ см}^3/\text{мин}$, давление $P_{пас} = 4 \text{ Па}$, ВЧ-мощность смещения на столике-подложкодержателе $W_{см. пас} = 1 \text{ Вт}$, время стадии $t_{пас} = 3 \text{ с}$. Количество циклов в исследуемых Bosch-процессах постоянно и равно 50.

Геометрические характеристики структур травления анализировали с применением сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV (JEOL Ltd., Япония). Параметры скэллопов (длина и глубина) измеряли в трех областях боковой поверхности протравленных структур – в верхней, средней и придонной (рис. 2).

Результаты и их обсуждение. В ходе проведения экспериментов ГАПТ кремния исследовали влияние соотношения времени стадий травления и пассивации, ВЧ-мощности смещения на электроде-подложкодержателе, давления и скорости газовых потоков используемых газов на стадии травления на линейные размеры скэллопов. При этом также учитывали полученные профили травления, отсутствие эффекта «черного кремния» и равномерность травления. Операционные параметры стадии травления при проведении экспериментов по ГАПТ кремния приведены в табл. 1, результаты исследований влияния данных операционных параметров шага травления на характеристики скэллопов – в табл. 2. Следует отметить, что во всех исследуемых режимах Bosch-процесса максимальные значения размеров скэллопов соответствуют верхним областям боковых стенок структур, минимальные – донным, что связано с механизмом задержки реактивного ионного травления [10].

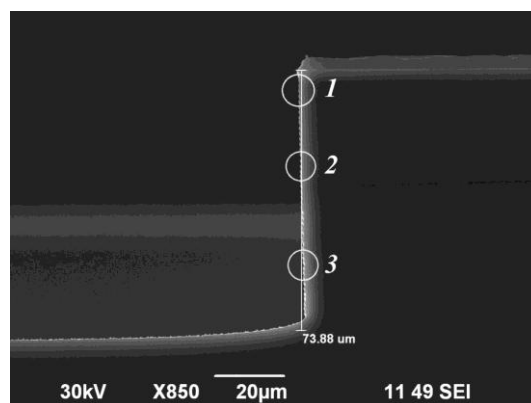


Рис. 2. Микроснимок профиля щели после ГАПТ кремния: 1, 2, 3 – верхняя, средняя и придонная области боковой поверхности структуры соответственно

Fig. 2. Micrograph of the trench profile after deep anisotropic plasma silicon etching: 1, 2, 3 – upper, middle and near-bottom areas of side surface of the structure, respectively

Режимы стадии ГАПТ кремния

Таблица 1

Etching step recipe of the Si DRIE process

Table 1

Номер режима	$W_{ИСП}$, Вт	$W_{см}$, Вт	$t_{тр}$, с	$P_{тр}$, Па	Q_{O_2} , $\text{см}^3/\text{мин}$	Q_{SF_6} , $\text{см}^3/\text{мин}$	Q_{Ar} , $\text{см}^3/\text{мин}$
1 (базовый)	800	5	9	7	20	250	10
2	800	5	7	7	20	250	10
3	800	5	4	7	20	250	10
4	800	5	4	5	20	250	10
5	800	5	4	3	20	250	10
6	800	10	4	3	20	250	10
7	800	30	4	3	20	250	10
8	800	30	4	3	0	250	10
9	800	30	4	3	10	250	10

Таблица 2
Результаты исследований режимов Bosch-процесса ГАПТ кремния

Table 2

Studies results of the Si DRIE Bosch process recipes

Номер режима	l_{\max} , мкм	l_{\min} , мкм	$l_{\text{ср}}$, мкм	b_{\max} , мкм	b_{\min} , мкм	$b_{\text{ср}}$, мкм	h , мкм	$V_{\text{тр}}$, мкм/мин
1 (базовый)	1,84	1,12	1,48	0,52	0,38	0,45	74	6,84
2	1,58	0,90	1,24	0,44	0,32	0,38	62	6,78
3	1,12	0,68	0,90	0,36	0,24	0,30	45	6,75
4	1,05	0,60	0,84	0,32	0,22	0,27	42	6,30
5	0,90	0,54	0,72	0,27	0,19	0,23	36	5,40
6	0,96	0,60	0,78	0,27	0,17	0,22	39	5,80
7	1,16	0,56	0,85	0,22	0,10	0,16	42,5	6,38
8	1,06	0,62	0,84	0,56	0,24	0,40	42	6,27
9	1,18	0,56	0,87	0,27	0,19	0,23	43,3	6,50

Примечание: l_{\max} , l_{\min} , $l_{\text{ср}}$ – максимальная, минимальная и средняя длина скэллопов соответственно; b_{\max} , b_{\min} , $b_{\text{ср}}$ – максимальная, минимальная и средняя глубина скэллопов соответственно; h – глубина протравленной кремниевой структуры; $V_{\text{тр}}$ – скорость травления

Анализ полученных результатов исследований позволил установить зависимости геометрических параметров скэллопов и скорости травления от времени травления, ВЧ-мощности смещения на электроде-подложкодержателе, давления и расхода кислорода на стадии травления (рис. 3).

Стадия травления в Bosch-процессе является изотропной, поэтому в результате последовательного уменьшения времени травления с 9 до 4 с (при постоянных остальных операционных характеристиках) и, следовательно, сокращения длительности воздействия на обрабатываемую поверхность получены меньшие линейные размеры микрошероховатости (рис. 3, а). Так, при сокращении времени травления до 4 с средние значения длины и глубины скэллопов уменьшились до 0,9 и 0,30 мкм соответственно (режим 3) по сравнению с параметрами микрошероховатостей режима № 1 (1,48 и 0,45 мкм соответственно). Скорость травления процесса при этом снизилась незначительно (на 1,3 %) до 6,75 мкм/мин (рис. 3, б). Предположительно, это связано с тем, что при уменьшении времени стадии травления сокращается его полезная длительность в процентном соотношении при переключении стадий травление – пассивация, так как системы подачи рабочих газов и регулировки давления обеспечивают переключение стадий примерно за 0,5 с. Дальнейшее сокращение времени стадии травления до 3 с привело к появлению на дне структуры эффекта «черного кремния» с высотой микроигл, соизмеримой с глубиной структуры травления (рис. 4). Возникновение микроигл объясняется тем, что фторуглеродная пленка, осаждаемая на стадии пассивации, не успевает на стадии травления полностью стравиться с горизонтальной поверхности за 3 с. Остатки пленки образуют микромаскирующие области на обрабатываемой поверхности, что при последующем травлении приводит к неполному стравливанию кремния под этими областями. Поэтому в качестве оптимального значения выбрано время травления, равное 4 с.

Установлено, что с понижением рабочего давления на стадии травления средние значения длины и глубины скэллопов уменьшаются (рис. 3, в). Так, при снижении давления с 7 до 3 Па (режим 5) при времени травления 4 с длина скэллопов уменьшилась с 0,90 до 0,72 мкм, а глубина – с 0,30 до 0,23 мкм. При этом скорость процесса травления

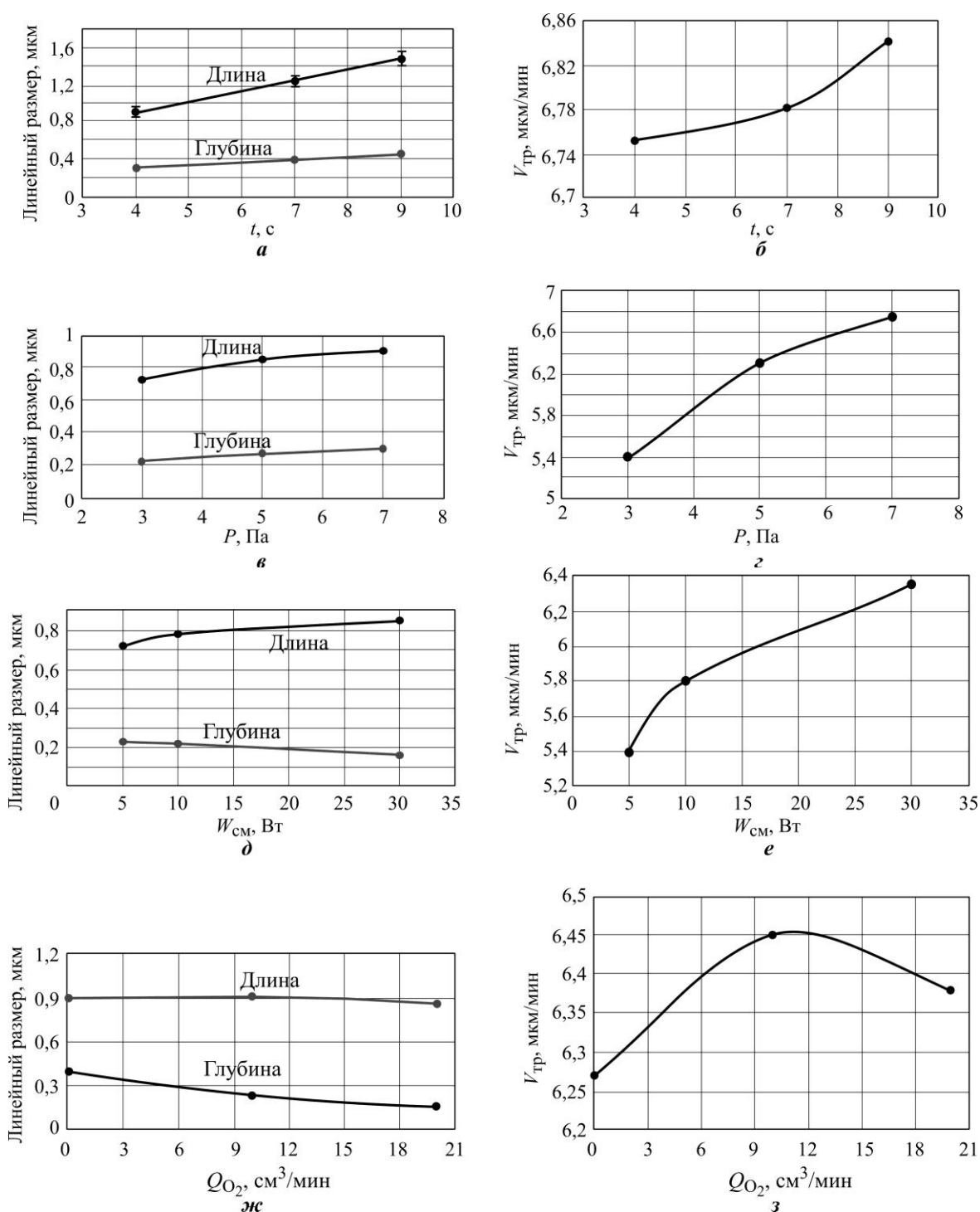


Рис. 3. Зависимости размеров скэллопов и скорости травления кремния от операционных параметров стадии травления Bosch-процесса: а – $l_{cp}, b_{cp} = f(t_{tr})$; б – $v_{tr} = f(t_{tr})$; в – $l_{cp}, b_{cp} = f(P)$; г – $v_{tr} = f(P)$; д – $l_{cp}, b_{cp} = f(W_{ср})$; е – $v_{tr} = f(W_{ср})$; ж – $l_{cp}, b_{cp} = f(Q_{O_2})$; з – $v_{tr} = f(Q_{O_2})$

Fig. 3. Dependences of the scallop sizes and the silicon etching rate on the operating parameters of the Bosch process etching step: а – $l_{cp}, b_{cp} = f(t_{tr})$; б – $v_{tr} = f(t_{tr})$; в – $l_{cp}, b_{cp} = f(P)$; г – $v_{tr} = f(P)$; д – $l_{cp}, b_{cp} = f(W_{ср})$; е – $v_{tr} = f(W_{ср})$; ж – $l_{cp}, b_{cp} = f(Q_{O_2})$; з – $v_{tr} = f(Q_{O_2})$

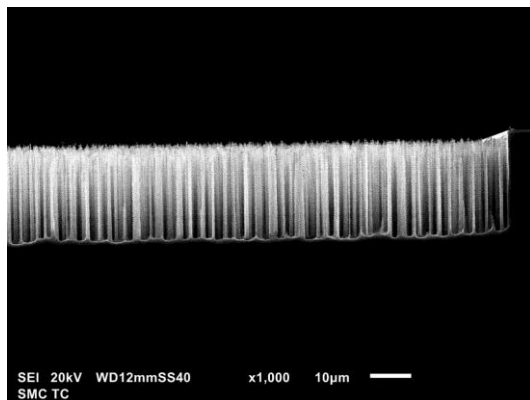


Рис. 4. Микрофотография структуры после уменьшения времени стадии травления до 3 с
Fig. 4. Micrograph of the structure after reducing the etch step time to 3 s

кремния уменьшилась с 6,75 до 5,40 мкм/мин (рис. 3, з). Снижение скорости травления на 20 % и размеров скэллопов при низком давлении объясняется, во-первых, падением концентрации травящих частиц (ионов и химически активных частиц) и, во-вторых, уменьшением их рассеяния и, соответственно, горизонтальной составляющей скорости травления. Давление ниже 3 Па не обеспечивает стабильности поддержания плазменного ВЧ-разряда, что приводит к невоспроизводимости получаемых результатов. В связи с этим предельное нижнее значение рабочего давления на стадии травления составляет 3 Па.

Эксперименты, проведенные в режимах № 5–7 показали, что при увеличении ВЧ-мощности смещения на электроде-подложкодержателе длина шероховатости боковых стенок структур увеличивается, а глубина уменьшается (рис. 3, д). Следует отметить, что по сравнению с базовым процессом травления (режим № 1) геометрические характеристики скэллопов, полученные в режимах № 5–7, в 1,5–2,5 раза меньше. Как видно из рис. 3, д, увеличение ВЧ-мощности смещения до 30 Вт (режим 7) увеличивает длину скэллопов до 0,85 мкм и уменьшает их глубину до 0,16 мкм, что связано с увеличением энергии ионов и их вертикальной направленности. С этими факторами связан рост скорости травления кремния при увеличении ВЧ-мощности смещения (рис. 3, е). Необходимо обратить внимание на тот факт, что дальнейшее увеличение ВЧ-мощности смещения значительно снижает селективность травления кремния по отношению к фоторезистивной маске, что связано с ростом интенсивности ионной бомбардировки обрабатываемой поверхности и, соответственно, с повышением ее температуры, которая способствует ускоренной деструкции фоторезиста. Вследствие этого выбрано значение ВЧ-мощности смещения, равное 30 Вт, обеспечивающее меньшую шероховатость боковых стенок структур.

Состав газовой смеси играет важную роль в процессах плазменного травления [11, 12]. В проведенных экспериментах при формировании структур на стадии травления Bosch-процесса использовали смесь газов $SF_6 + O_2 + Ar$. В данном случае травление кремния осуществляется в основном за счет химического взаимодействия радикалов фтора с атомами кремния с образованием летучего соединения фторида кремния SiF_4 . Ионы аргона обеспечивают физическое распыление преимущественно горизонтальной поверхности. В зависимости от процентного содержания кислорода в газовой смеси он, во-первых, может способствовать повышению концентрации радикалов фтора в газовой фазе разряда и, соответственно, увеличению скорости травления кремния, во-вторых, может пассивировать поверхности формируемой структуры за счет образования на них тонкого окисного слоя, препятствующего взаимодействию радикалов фтора с поверхностью кремния [11, 12]. Поэтому, добавляя кислород в газовую смесь, можно уменьшить шероховатость боковых стенок структур, что и наблюдается на графике зависимости глубины скэллопов от расхода кислорода (рис. 3, ж). При этом увеличение расхода кислорода в газовой смеси от 0 до 10 см³/мин приводит к росту скорости травления до 6,5 мкм/мин из-за увеличения коэффициента использования гексафторида серы SF_6 , а при дальнейшем увеличении содержания кислорода до 20 см³/мин скорость

травления незначительно уменьшается пропорционально его концентрации в SF₆ до 6,35 мкм/мин (рис. 3, з). Несмотря на то что при Q_{O₂} = 20 см³/мин скорость травления меньше, чем при Q_{O₂} = 10 см³/мин, и наблюдается снижение селективности кремния по отношению к фоторезистивной маске, выбрано именно это значение расхода кислорода ввиду обеспечения меньшей шероховатости скэллопов.

На основании результатов анализа полученных экспериментальных данных разработан процесс ГАПТ кремния с минимальной шероховатостью боковых стенок структур. Операционные значения параметров разработанного процесса приведены в табл. 3.

Таблица 3
Операционные значения (по умолчанию) параметров
разработанного процесса ГАПТ кремния со сниженной шероховатостью
боковых стенок структур (T = 15 °C)

Table 3
Operational parameters (by default) of the developed Si DRIE process
with reduced sidewalls roughness (T = 15 °C)

Параметр	Стадия травления		Стадия пассивации
	Депассивация	Травление	
Расход SF ₆ , см ³ /мин	30	250	0
Расход O ₂ , см ³ /мин	30	20	0
Расход C ₄ F ₈ , см ³ /мин	0	0	160
Расход Ar, см ³ /мин	70	10	0
Давление, Па	9	3	4
ВЧ-мощность ИСП, Вт	800	800	800
Мощность RF, Вт	50	30	1
Время, с	1	4	3

На рис. 5 представлена структура «глухого» отверстия глубиной ~ 46,3 мкм и диаметром 5 мм, полученная при применении разработанного Bosch-процесса со сниженной шероховатостью боковых стенок структур.

Анализ боковых поверхностей структур, сформированных в базовом и разработанном процессах, показал, что средние значения длины и глубины скэллопов уменьшились с 1,48 до 0,85 мкм и с 0,45 до 0,16 мкм соответственно (режимы 1 и 7). Средняя скорость травления кремния при этом изменилась незначительно и составила ~ 6,4 мкм/мин по сравнению с базовым режимом № 1, в котором v_{тр} = 6,8 мкм/мин, неравномерность травления осталась на прежнем уровне ± 2 % и угол наклона профиля составил не менее 88,5°. Эффект «черного кремния» как до, так и после оптимизации процесса отсутствует.

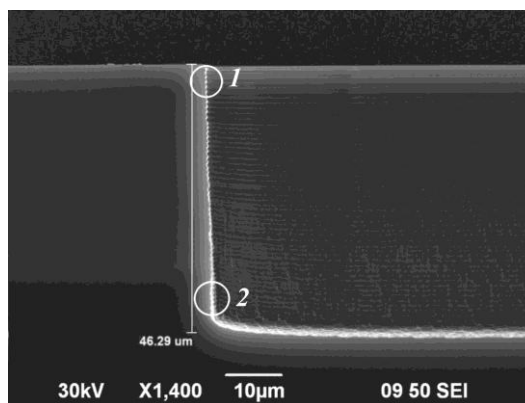


Рис. 5. РЭМ-микрофотография кремниевой структуры «глухого» отверстия, полученной при применении разработанного Bosch-процесса: 1, 2 – верхняя и придонная области боковой поверхности соответственно

Fig. 5. SEM micrograph of a blind hole silicon structure obtained in the developed Bosch process: 1, 2 – upper and near-bottom areas of side surface, respectively

Заключение. Разработанный Bosch-процесс травления кремния характеризуется следующими параметрами: глубина травления до 120 мкм, неравномерность травления не более 4 % на пластинах диаметром 100 мм, скорость травления около 6,4 мкм/мин, угол профиля не менее 88,5°. При этом эффект «черного кремния» на дне структуры отсутствует, уменьшена на 65 % глубина и на 43 % длина скэллопов от верхней поверхности к донной части структуры. Исследования показали, что основным технологическим приемом, позволяющим значительно уменьшить размер скэллопов, является сокращение длительности стадии травления Bosch-процесса.

Разработанный технологический процесс может быть интегрирован в технологический маршрут и применен в технологии изготовления КМОП-структур и МЭМС.

Литература

1. The basics of the Bosch process (Silicon Deep RIE) // Samco [Электронный ресурс]. URL: <https://www.samcointl.com/basics-bosch-process-silicon-deep-rie/> (дата обращения: 20.08.2023).
2. *Tang Y., Sandoughsaz A., Najafi Kh.* Ultra high aspect-ratio and thick deep silicon etching (UDRIE) // 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Las Vegas: IEEE, 2017. P. 700–703. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2017.7863504>
3. *Голишников А. А., Костюков Д. А., Путья М. Г.* Исследование процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния в парогазовой смеси с пониженной полимеризационной способностью // Изв. вузов. Электроника. 2011. № 3 (89). С. 14–19. EDN: NUZUUV.
4. *Choi Y. C., Kim J. S., Kwon S. Y., Kong S. H.* The improvement of performance through minimizing scallop size in MEMS based micro wind turbine // Micromachines. 2021. Vol. 12. Iss. 10. Art. No. 1261. <https://doi.org/10.3390/mi12101261>
5. *Chen W.-C., Fang W., Li S.-S.* High-*Q* integrated CMOS-MEMS resonators with deep-submicrometer gaps and quasi-linear frequency tuning // Journal of Microelectromechanical Systems. 2012. Vol. 21. No. 3. P. 688–701. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2189360>
6. Portable gas chromatograph with integrated components / *J. A. Dziuban, J. Mróz, M. Szczygielska et al.* // Sensors and Actuators A: Physical. 2004. Vol. 115. Iss. 2-3. P. 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.04.028>
7. Scallop reduction in Bosch process using a small chamber and rapid gas switching rate / *H. Tanaka, H. Ogiso, Sh. Nakano et al.* // IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines. 2016. Vol. 136. Iss. 12. P. 499–504. (На яп. яз.). <https://doi.org/10.1541/ieejsmas.136.499>
8. Etch overview for microsystems: Primary knowledge participant guide / Southwest Center for Microsystems Education (SCME) // nanoHUB [Электронный ресурс]. URL: https://nanohub.org/resources/26401/download/Fab_Etch_PK00_PG.pdf (дата обращения: 13.09.2023).
9. Deep reactive ion etching of sub-micrometer trenches with ultra-high aspect ratio / *J. Parasuraman, A. Summanwar, F. Marty et al.* // Microelectronic Engineering. 2014. Vol. 113. P. 35–39. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.06.010>
10. *Голишников А. А., Путья М. Г.* Плазменные процессы в нанoeлектронике, микро- и наносистемной технике: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2022. 163 с.
11. *Мочалова А. И., Галперин В. А., Данилкин Е. В.* Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологии. М.: МИЭТ, 2007. 332 с.
12. *Голишников А. А., Сагунова И. В., Шевяков В. И.* Основы технологии электронной компонентной базы: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2022. 268 с.

Статья поступила в редакцию 10.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.08.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Голишников Александр Анатольевич – 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), golishnikov1960@mail.ru

Дюжев Николай Алексеевич – кандидат физико-математических наук, директор Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база», доцент Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dyuzhev@ckp-miet.ru

Парамонов Владислав Витальевич – ведущий инженер Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), paramonov@ckp-miet.ru

Потапенко Илья Викторович – студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), техник участка плазмохимических процессов опытного производства НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), ilya.potapenko.2015@gmail.com

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

Сомов Никита Михайлович – аспирант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-технолог участка плазмохимических процессов опытного производства НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), somovnm@mail.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. The basics of the Bosch process (Silicon Deep RIE). *Samco*. Available at: <https://www.samcointl.com/basics-bosch-process-silicon-deep-rie/> (accessed: 20.08.2023).
2. Tang Y., Sandoughsaz A., Najafi Kh. Ultra high aspect-ratio and thick deep silicon etching (UDRIE). *2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Las Vegas, IEEE, 2017, pp. 700–703. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2017.7863504>
3. Golishnikov A. A., Kostyukov D. A., Putrya M. G. Research of deep anisotropic silicon etching process in gas-vapor mixture with decreased polymerization capacity. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2011, no. 3 (89), pp. 14–19. (In Russian). EDN: NUZUUU.
4. Choi Y. C., Kim J. S., Kwon S. Y., Kong S. H. The improvement of performance through minimizing scallop size in MEMS based micro wind turbine. *Micromachines*, 2021, vol. 12, iss. 10, art. no. 1261. <https://doi.org/10.3390/mi12101261>
5. Chen W.-C., Fang W., Li S.-S. High- Q integrated CMOS-MEMS resonators with deep-submicrometer gaps and quasi-linear frequency tuning. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, vol. 21, no. 3, pp. 688–701. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2189360>

6. Dziuban J., Mróz J., Szczygielska M., Małachowski M., Górecka-Drzazga A., Walczak R., Buła W., Zalewski D. et al. Portable gas chromatograph with integrated components. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, vol. 115, iss. 2-3, pp. 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.04.028>

7. Tanaka H., Ogiso H., Nakano Sh., Hayami T., Miyazaki T., Khumpuang S., Hara Sh. Scallop reduction in Bosch process using a small chamber and rapid gas switching rate. *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, 2016, vol. 136, iss. 12, pp. 499–504. (In Japanese). <https://doi.org/10.1541/ieejsmas.136.499>

8. Etch overview for microsystems: Primary knowledge participant guide, by Southwest Center for Microsystems Education (SCME). *nanoHUB*. Available at: https://nanohub.org/resources/26401/download/Fab_Etch_PK00_PG.pdf (accessed: 13.09.2023).

9. Parasuraman J., Summanwar A., Marty F., Basset Ph., Angelescu D., Bourouina T. Deep reactive ion etching of sub-micrometer trenches with ultra-high aspect ratio. *Microelectronic Engineering*, 2014, vol. 113, pp. 35–39. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.06.010>

10. Golishnikov A. A., Putrya M. G. *Plasma processes in nanoelectronics, micro- and nanosystem technology*, study guide. Moscow, MIET, 2022. 163 p. (In Russian).

11. Mochalov A. I., Galperin V. A., Danilkin E.V. *Plasma etching processes in micro- and nanotechnology*. Moscow, MIET, 2007. 332 p. (In Russian).

12. Golishnikov A. A., Sagunova I. V., Shevyakov V. I. *Fundamentals of electronic component base technology*, study guide. Moscow, MIET, 2022. 268 p. (In Russian).

The article was submitted 10.08.2023; approved after reviewing 23.08.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Alexander A. Golishnikov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K. A. Valiev, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), golishnikov1960@mail.ru

Nikolai A. Dyuzhev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Director of the Center for Collective Use “Microsystem Technology and Electronic Component Base“, Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K. A. Valiev, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dyuzhev@ckp-miet.ru

Vladislav V. Paramonov – Senior Engineer of the Center for Collective Use “Microsystem Technology and Electronic Component Base“, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), paramonov@ckp-miet.ru

Ilya V. Potapenko – Student of the National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Technician of the Plasma Chemical Processes Section of the Pilot Production, SMC “Technological Center” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), ilya.potapenko.2015@gmail.com

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

Nikita M. Somov – PhD student of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K. A. Valiev, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Process Engineer of the Plasma Chemical Processes Section of the Pilot Production, RPC “Technological Center” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), somovnm@mail.ru

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

Исследования факторов, влияющих на сопротивление контактов в термоэлементах

*Е. П. Корчагин, Е. В. Нагрешников, М. Ю. Штерн, М. С. Рогачев,
Б. Р. Мустафоев, Ю. И. Штерн*

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

Korchagin_Egor@org.miet.ru

Аннотация. Термоэлектрические генераторы используются в качестве альтернативных источников электроэнергии, в том числе для преобразования «бросового» тепла в электроэнергию. При конструировании термоэлектрических генераторов возникает проблема создания эффективных контактов для коммутации ветвей в термоэлементе, а также секций из различных термоэлектрических материалов в многосекционном термоэлементе. В работе в процессе моделирования с использованием разработанной методики показано влияние удельного сопротивления контактов на КПД термоэлементов. Установлено, что для эффективной работы термоэлементов удельное сопротивление контактов не должно превышать 10^{-8} Ом·м². Контактные системы на основе сплавов Ni-P, Co-P сформированы химическим осаждением металлов из раствора гипофосфита натрия на ветви термоэлементов. Исследована поверхность термоэлектрических материалов с шероховатостью 300, 500 и 700 нм, которая меняет площадь фактического контакта сформированных контактных систем. В результате измерений установлено, что минимальное сопротивление контакта наблюдается при шероховатости 700 нм. Расчеты показали, что при шероховатости поверхности 700 нм сопротивление термоэлемента снижается на 7,8 % по сравнению с контактами, сформированными на поверхности с шероховатостью 300 нм, что повышает эффективность термоэлементов.

Ключевые слова: термоэлемент, контакты, химическое осаждение, контактное сопротивление, эффективность

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

Для цитирования: Исследования факторов, влияющих на сопротивление контактов в термоэлементах / Е. П. Корчагин, Е. В. Нагрешников, М. Ю. Штерн и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 773–783. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-773-783>. – EDN: OAQXKU

Original article

Research of factors impacting contact resistance in thermoelements

E. P. Korchagin, E. V. Nagreshnikov, M. Yu. Shtern, M. S. Rogachev, B. R. Mustafоеv, Yu. I. Shtern

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Korchagin_Egor@org.miet.ru

Abstract. Thermoelectric generators are used as alternate power sources, among others for waste heat conversion to electrical energy. In the design of thermoelectric generators the problem arises of effective contacts creation for commutation legs in a thermoelement and sections made of various thermoelectric materials in a multi-section thermoelement. In this work, the impact of contacts resistivity on efficiency of thermoelements is shown in the modeling process using developed technique. It was established that for effective operation of thermoelements, the contacts resistance should not exceed 10^{-8} Ohm·m². Contact systems based on Ni-P and Co-P alloys were formed by chemical deposition of metals from a solution of sodium hypophosphite on the branches of thermoelements. The surface of thermoelectric materials with roughness of 300 nm, 500 nm and 700 nm, which changes the true contact area of formed contact systems, was studied. Upon measurement results it has been established that with a surface roughness of 700 nm, thermoelement resistance decreases by 7.8 % compared to contacts formed on a surface with a roughness of 300 nm, which increases the efficiency of thermoelements.

Keywords: thermoelement, contacts, chemical deposition, contact resistance, efficiency

Funding: the work has been performed under state assignment (Agreement FSMR-2023-0014).

For citation: Korchagin E. P., Nagreshnikov E. V., Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Mustafоеv B. R., Shtern Yu. I. Research of factors impacting contact resistance in thermoelements. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 773–783. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-773-783>. – EDN: OAQXKU

Введение. На сегодняшний день одна из основных мировых проблем – острый недостаток традиционных невозобновляемых источников энергии. По данным Аналитического центра при правительстве РФ, в 2021 г. потребление электроэнергии уже приблизилось к прогнозируемому уровню 2040 г. [1]. В связи с этим актуальной задачей является поиск и внедрение эффективных альтернативных источников энергии [2].

Термоэлектрические генераторы применяются как альтернативные источники электроэнергии, в том числе для преобразования «бросового» тепла в электроэнергию, что может иметь большое значение для энергетической отрасли, так как эффективность современных систем, генерирующих энергию, не превышает 40 % [3]. Основная структурная единица термоэлектрического генератора – термоэлементы.

В настоящей работе рассматриваются факторы, влияющие на сопротивление контактов в термоэлементах.

Влияние сопротивления контакта на термоэлектрическую добротность. Широкое применение термоэлектрических генераторов ограничено низким КПД, достигающим в лучшем случае 8 %. Эффективность термоэлектрических генераторов в основном определяется КПД термоэлементов:

$$\eta = \frac{T_r - T_x}{T_r} \frac{\sqrt{(1 + Z\bar{T})} - 1}{\sqrt{(1 + Z\bar{T})} + T_x / T_r}, \quad (1)$$

где T_r и T_x – температура горячих и холодных спаев термоэлементов соответственно; Z – термоэлектрическая добротность термоэлектрических материалов (ТЭМ), из которых изготавливаются термоэлементы; $\bar{T} = (T_r + T_x) / 2$.

Согласно формуле (1) КПД зависит от термоэлектрической добротности Z ТЭМ, определяемой следующим образом:

$$Z = \frac{s^2}{\kappa\rho}, \quad (2)$$

где s – термоЭДС; κ – теплопроводность; ρ – удельное сопротивление ТЭМ.

Кроме того, КПД термоэлемента пропорционален разности температур горячих и холодных спаев: $\Delta T = T_r - T_x$. Повышение ΔT возможно, если увеличить интервал рабочих температур термоэлемента. Однако при этом следует учитывать, что Z ТЭМ имеет максимальные значения в ограниченном интервале температур. Поэтому в структуре термоэлемента, работающего в широком интервале температур, необходимо использовать не два ТЭМ n - и p -типа, как в простом термоэлементе (рис. 1, *a*), а больше. Реализовать такую структуру возможно, создавая ветви термоэлемента, состоящие из нескольких секций. Секции изготавливают из различных ТЭМ, имеющих максимальное значение Z в интервале рабочих температур каждой секции. На рис. 1, *б* представлен многосекционный термоэлемент, изготовленный из следующих ТЭМ: $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,8}\text{Se}_{0,2}$; $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$; PbTe ; SiGe (1,8 вес. % P); $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$; $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$; GeTe ; SiGe (0,8 вес. % B) [4, 5].

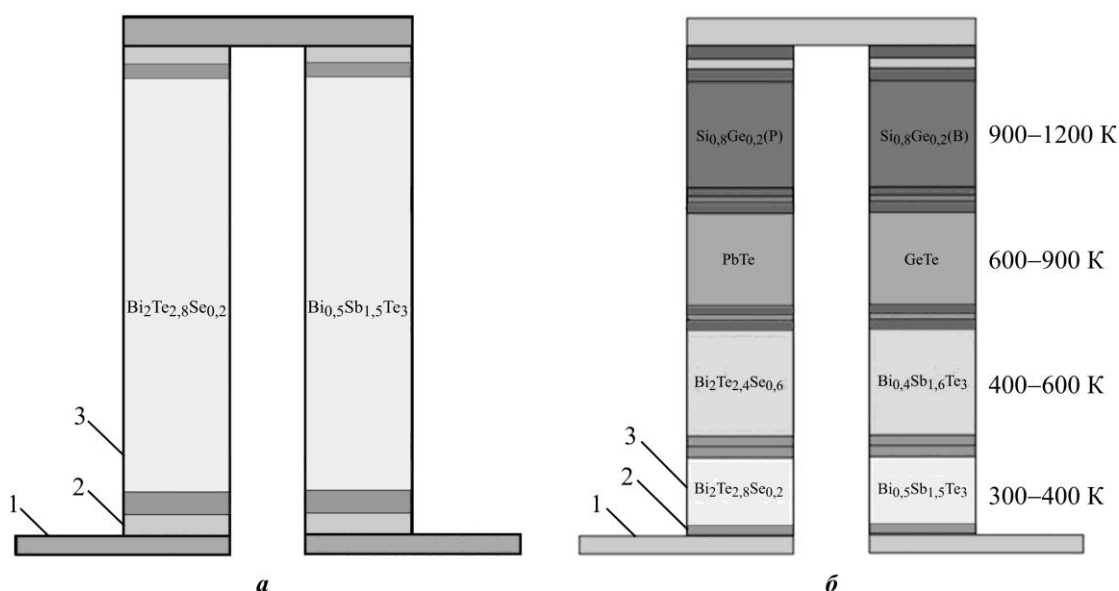


Рис. 1. Структурные схемы простого (*a*) и многосекционного (*б*) термоэлементов:

1 – коммутационная шина; 2 – контактная система; 3 – ТЭМ

Fig. 1. Schematic images of a simple (*a*) and a multi-section (*b*) thermoelements:

1 – commutation bus; 2 – contact system; 3 – thermoelectric materials

Сопротивление термоэлемента должно быть минимальным, чтобы уменьшить тепло Джоуля, выделяемое в термоэлементе. Это тепло оказывает негативное влияние на эффективность термоэлемента, так как снижает основной параметр – разность температур ΔT между его горячим и холодным спаями. Сопротивление термоэлемента главным образом определяется сопротивлением ТЭМ, а также сопротивлением контактов. Интерметаллические ТЭМ имеют низкое удельное сопротивление на уровне 10^{-3} Ом·см. Однако необходимо учитывать и влияние переходного сопротивления области контакт – ТЭМ. Это сопротивление может быть соизмеримо с сопротивлением ветвей термоэлемента, что особенно критично для многосекционных термоэлементов, так как количество контактов в их структуре значительно больше, чем в простом термоэлементе. Переходное сопротивление области контакт – ТЭМ определяется удельным контактным сопротивлением ρ_k , устанавливаемым экспериментально.

Таким образом, общее сопротивление $R_{\text{общ}}$ простого термоэлемента, имеющего четыре контакта к ветвям n - и p -типа, определяется следующим образом:

$$R_{\text{общ}} = R_T + 4R_k = \frac{\rho(n)l}{S} + \frac{\rho(p)l}{S} + 4\frac{\rho_k}{S} = \frac{(\rho(p) + \rho(n))l + 4\rho_k}{S}, \quad (3)$$

где R_T – сопротивление термоэлемента, определяемое ТЭМ ветвей, Ом; R_k – сопротивление контакта, Ом; ρ – удельное сопротивление ТЭМ, Ом·м²; ρ_k – удельное контактное сопротивление, Ом·м²; l – длина ветви, м; S – площадь сечения ветви и, соответственно, площадь контакта, м².

Сопротивление контакта в основном определяется сопротивлением переходного слоя, определяемого удельным контактным сопротивлением. При расчетах общего сопротивления используются средние значения удельного сопротивления ТЭМ ветвей n - и p -типа, удельного контактного сопротивления к ветвям n - и p -типа и общая длина ветвей, равная $2l$. Расчеты проводили без учета сопротивления материалов коммутационных шин и контактов, изготавливаемых из металлов с низким удельным сопротивлением и незначительно влияющих на сопротивление термоэлемента.

Для определения КПД термоэлемента в формуле (2) при расчете Z использовали средние значения термоЭДС и теплопроводности ТЭМ n - и p -типа проводимости. При определении удельного сопротивления учитывали сопротивление контактов, которое определяется согласно формуле (3):

$$\rho_{\text{общ}} = \frac{R_{\text{общ}}S}{2l} = \frac{(\rho(p) + \rho(n)) + 4\rho_k}{S} \frac{S}{2l} = \rho_{\text{ср}} + \frac{2\rho_k}{l}. \quad (4)$$

С учетом формулы (4) термоэлектрическая добротность термоэлемента равна:

$$Z = \frac{s_{\text{ср}}^2}{\kappa_{\text{ср}} \left(\rho_{\text{ср}} + \frac{2\rho_k}{l} \right)}, \quad (5)$$

где $s_{\text{ср}}$, $\kappa_{\text{ср}}$ и $\rho_{\text{ср}}$ – соответственно средние значения термоЭДС, теплопроводности удельного сопротивления ТЭМ n - и p -типа проводимости.

Проведем оценку влияния удельного контактного сопротивления на КПД термоэлемента. При разработке технологии формирования контактов металл – полупроводник следует иметь в виду, что контакт считается омическим, если его удельное сопротивление менее 10^{-7} Ом·м² [6]. Для термоэлемента значение удельного сопротивления не должно превышать 10^{-8} Ом·м² [7, 8].

В результате моделирования КПД термоэлемента с учетом уравнения (5) установлена зависимость этого параметра от удельного контактного сопротивления для термоэлемента с различной длиной ветвей. Размер ветвей определяет вклад контактного сопротивления в общее сопротивление. Чем меньше длина ветви, тем выше удельный вес контактного сопротивления. Результаты моделирования представлены на рис. 2. Видно, что значительное снижение КПД наблюдается в термоэлементах, удельное сопротивление контактов которых превышает 10^{-8} Ом·м². Для длины термоэлемента, равной 1 мм, сопротивление не должно быть более $5 \cdot 10^{-9}$ Ом·м².

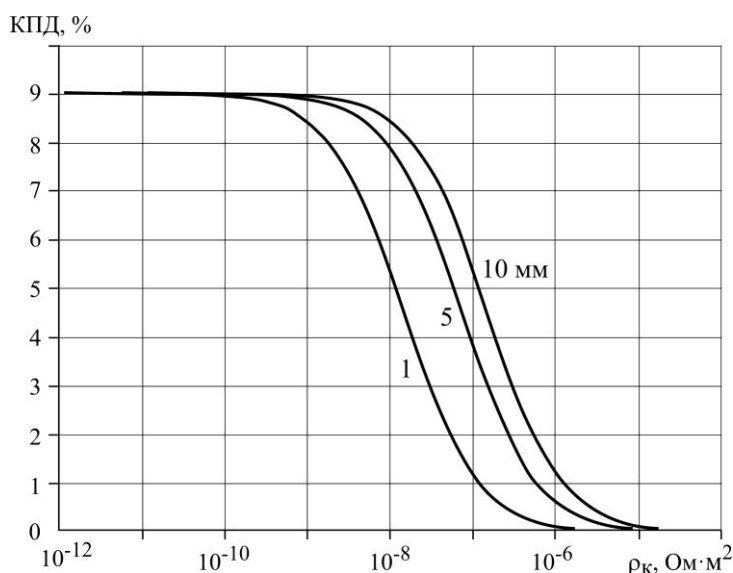


Рис. 2. Зависимость КПД от удельного контактного сопротивления термоэлементов с различной длиной ветвей
Fig. 2. Dependence of efficiency on specific contact resistance of thermoelements with different leg lengths

Таким образом, сопротивление контакта оказывает существенное влияние на КПД термоэлемента. Согласно формуле (3) сопротивление контакта обратно пропорционально его площади. В связи с этим необходимо определить способы увеличения площади контакта при заданном сечении ветвей термоэлемента. Фактическая площадь контакта может быть значительно увеличена за счет шероховатости поверхности ТЭМ, на которой формируются контакты. Для подтверждения этого факта проводили исследование контактов, сформированных на поверхности ТЭМ с шероховатостью 300, 500 и 700 нм.

Эксперимент. Подготовка поверхности. Подготовку поверхности термоэлемента осуществляли с помощью безабразивной механической обработки по методике, предложенной в работе [9]. По шероховатости поверхности определяют фактическую площадь контакта на границе металл – ТЭМ. Чем выше шероховатость, тем больше фактическая площадь контакта и, соответственно, меньше сопротивление контакта. Для проведения исследований изготовлены образцы ветвей термоэлемента с одинаковой площадью сечения и шероховатостью 300, 500 и 700 нм. Однако значение шероховатости не должно превышать значения толщины пленки формируемых контактов, так как в этом случае снижается адгезионная прочность контактов и увеличивается удельное контактное сопротивление [10, 11]. Схемы ветвей термоэлемента с нанесенными контактами представлены на рис. 3.

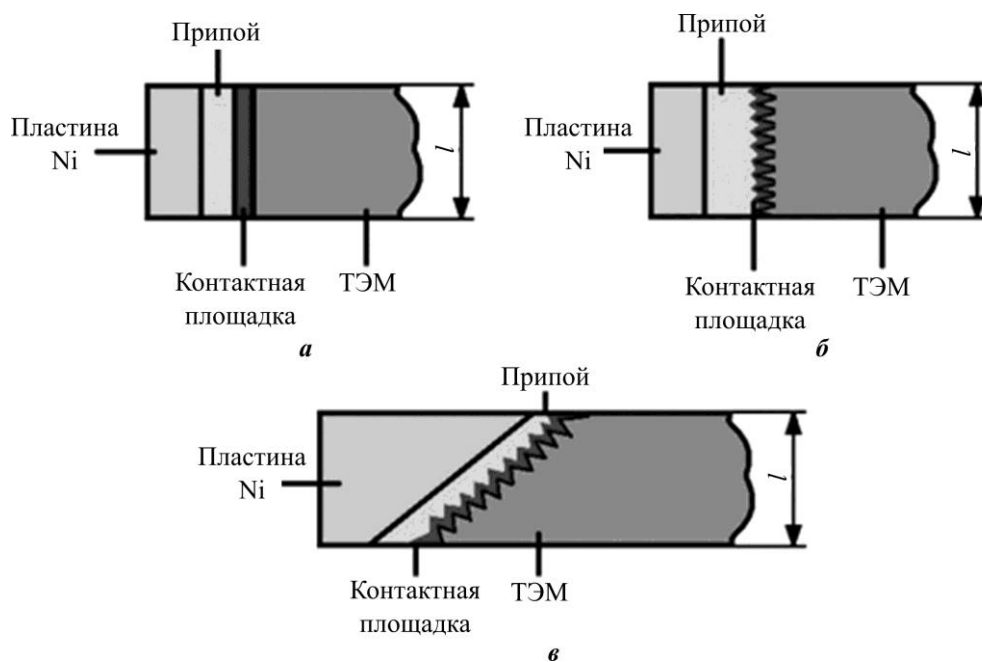


Рис. 3. Схемы ветвей термоэлемента: *a* – контакт, сформированный на поверхности ТЭМ с низкой шероховатостью; *б* – контакт, сформированный на поверхности ТЭМ с высокой шероховатостью; *в* – контакт, сформированный на ветви с увеличенным сечением (за счет скоса) и высокой шероховатостью поверхности ТЭМ

Fig. 3. Schemes of thermoelement leg: *a* – contact formed on the surface of the thermoelectric materials with low roughness; *b* – contact formed on the thermoelectric materials surface with high roughness; *c* – contact formed on a leg with an increased cross-section (due to the bevel) and high surface roughness of the thermoelectric materials

Контакты изготавливали следующим образом. Поверхность ветви, выполненной из наноструктурированного ТЭМ на основе Bi_2Te_3 [12], подготавливали с помощью механической и химической обработки до необходимой шероховатости [11]. Контакты формировали с помощью химического осаждения Ni или Co. Пленки этих металлов часто используются в качестве контактов в термоэлементе и имеют необходимые адгезионную прочность и удельное контактное сопротивление, а также диффузионно-барьерные свойства при температурах до 600 К [9]. После химического осаждения металлических контактов для проведения исследований к ним припаивали никелевые пластины толщиной 1 мм.

Формирование контактов. Химическое осаждение металлов в зависимости от типа протекающей реакции возможно проводить с помощью восстановителя, реакции диспропорционирования и металлизации по контактному механизму [13]. В настоящей работе применен метод осаждения металлов с помощью восстановителя. Метод отличается равномерным распределением покрытия с одинаковой толщиной слоя на поверхностях с развитым рельефом [5]. В качестве восстановителя использовали гипофосфит натрия, применение которого характеризуется выделением фосфора в металлическом покрытии. С одной стороны, фосфор незначительно увеличивает удельное сопротивление контактного слоя, с другой – усиливает диффузионно-барьерные свойства контакта.

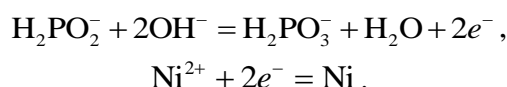
Для формирования контактного слоя на поверхности ТЭМ химическим осаждением металлов необходимо самопроизвольное протекание окислительно-восстановительных реакций в растворе. Для этого на поверхности ТЭМ необходимо создать ката-

литически активный слой методом химической активации поверхности ТЭМ с использованием палладиевого или серебряного катализатора. Для создания активирующего слоя также можно применять методы вакуумного напыления тонких слоев металлов порядка 50 нм, что достаточно для протекания реакции разложения гипофосфита натрия. В рамках настоящей работы использовали метод химической палладиевой активации с предварительной сенсбилизацией в растворе хлорида олова. Перед созданием активационного слоя образцы обрабатывали в течение 30 с в 20%-ном растворе HNO₃ для растворения оксидов на поверхности ТЭМ. По завершении создания каталитически активного слоя проводили осаждение контактных слоев Ni или Co. С этой целью предварительно активированную поверхность ТЭМ помещали в электролит. В результате частички осажденного палладия становятся центром активации для запуска автокаталитической реакции восстановления металла (Ni или Co). Состав раствора для химического осаждения Ni и Co приведен в табл. 1.

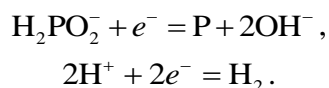
Таблица 1
Состав раствора для химического осаждения Ni и Co
Table 1
Solution composition and conditions for electroless plating of Ni and Co

Компоненты	Ni	Co
NiCl ₂ ·6H ₂ O	23 г/л	–
CoCl ₂ ·6H ₂ O	–	23 г/л
NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	35 г/л	35 г/л
NH ₄ Cl	50 г/л	50 г/л
25%-ный NH ₄ OH	50 мл/л	50 мл/л
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇	96 г/л	96 г/л
NaNO ₃	0,05 г/л	0,05 г/л

Стабилизацию температуры процесса (85–90 °С) с погрешностью ±1 °С осуществляли с помощью водяной бани ПЭ-4300. Время осаждения 30 мин, рН = 10...11. Кислотность раствора проверяли рН-метром – иономером «ЭКОТЕСТ-120», погрешность которого составляет ±0,03 рН и ±0,5 °С. При осаждении металлов с использованием в качестве восстановителя гипофосфита натрия на каталитически активной поверхности гипофосфит-ионов происходит генерация электронов с последующим восстановлением, например, Ni следующим образом:



Кроме осаждения Ni возможно протекание других побочных процессов:



Исследование контактного сопротивления. Для проведения измерений к нанесенному на торцы образцов ТЭМ химическим осаждением металлическому контакту припаивали пластину из Ni толщиной 1 мм. Пайку осуществляли с использованием оловосодержащего припоя SN100С в слабоактивном флюсе (3 г NH₄Cl растворяли в 77 мл глицерина). По завершении пайки образец промывали в ацетоне с использованием ультразвуковой ванны. Сопротивление контакта определяли по методике, приведенной в работе [14]. Для измерений подготовлено по четыре образца с контактами

из Ni и Co. Контакты формировали на поверхности образцов ТЭМ с разной степенью шероховатости R_a . Также измерено сопротивление контакта с увеличенной площадью поперечного сечения ветви. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2
Значения сопротивления контактов из Ni и Co, мОм

Table 2

Contact resistance values of Ni and Co, mOhm

Материал контакта	Номер образца	$R_a = 300$ нм	$R_a = 500$ нм	$R_a = 700$ нм	$R_a = 700$ нм (скос)
Ni	1	0,792	0,513	0,324	0,220
	2	0,662	0,407	0,242	0,185
	3	0,615	0,389	0,220	0,037
	4	0,567	0,415	0,197	0,036
Co	1	0,793	0,525	0,330	0,175
	2	0,720	0,425	0,283	0,143
	3	0,682	0,454	0,241	0,136
	4	0,617	0,435	0,210	0,121

На основе представленных результатов можно сделать вывод, что увеличение шероховатости поверхности образцов ТЭМ и, соответственно, площади фактического контакта формируемых металлических пленок приводит к снижению сопротивления контакта. Этот факт подтверждается низким сопротивлением в случае увеличения площади контакта за счет площади поперечного сечения образцов со скосом под 45° . В этом случае площадь контакта увеличивается на 40 %. Пропорционально этому значению, как видно из экспериментальных результатов, снижается сопротивление контакта. Однако изготавливать ветви со сложным сечением нерентабельно. Данный образец изготовлен только для демонстрации влияния площади контакта на его сопротивление. Следует отметить, что сопротивление контактов из кобальта несколько выше: это связано с его большим удельным сопротивлением по сравнению с никелем. Для того чтобы оценить положительный эффект снижения общего сопротивления термоэлемента от повышения уровня шероховатости поверхности ТЭМ, на которой формируются контакты, проведем следующий расчет.

Общее сопротивление термоэлемента $R_{\text{общ}}$ выражается формулой

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{ТЭМ}} + 4R_{\text{к}},$$

где $R_{\text{ТЭМ}}$ – сопротивление ТЭМ.

Среднее сопротивление контакта $R_{\text{к}}$ при шероховатости 300 нм равно 0,65 мОм; при шероховатости 700 нм составляет 0,25 мОм; при шероховатости 700 нм и увеличенной площади сечения контакта – 0,12 мОм. Сопротивление ТЭМ равно:

$$R_{\text{ТЭМ}} = \frac{\rho(n)l}{S} + \frac{\rho(p)l}{S},$$

где $\rho(n, p)$ – среднее удельное сопротивление ТЭМ соответствующего типа.

Предположим, что ветвь термоэлемента имеет длину 10 мм, площадь сечения 1 мм^2 , $\rho(p) = 9,43 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho(n) = 8,47 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Тогда

$$R_{\text{ТЭМ}} = 17,9 \text{ мОм}; \quad R_{\text{общ1}} = 20,50 \text{ мОм}; \quad R_{\text{общ2}} = 18,90 \text{ мОм}; \quad R_{\text{общ3}} = 18,38 \text{ мОм};$$

$$\delta = \left| \frac{R_{\text{общ1}} - R_{\text{общ2}}}{R_{\text{общ2}}} \right| \cdot 100 \% = 7,8 \% ; \quad \delta = \left| \frac{R_{\text{общ1}} - R_{\text{общ3}}}{R_{\text{общ3}}} \right| \cdot 100 \% = 10,3 \% .$$

В результате расчетов установлено, что при шероховатости поверхности 700 нм сопротивление термоэлемента снижается на 7,8 %. Пропорционально этому значению уменьшается и тепло Джоуля, выделяемое в термоэлементе, что положительно сказывается на увеличении разности температур между горячим и холодным спаями термоэлемента. Результаты исследований представлены для простых термоэлементов (см. рис. 1, а), в которых каждая ветвь имеет два контакта, а термоэлемент в целом – четыре контакта. В многосекционных термоэлементах (см. рис. 1, б) эффект снижения сопротивления контактов усиливается кратно числу контактов.

Заключение. Исследования факторов, влияющих на сопротивление контактных систем, формируемых в структуре термоэлемента, показали следующее. В процессе моделирования с использованием разработанной методики установлено, что для эффективной работы термоэлемента удельное сопротивление контактов не должно превышать 10^{-8} Ом·м². Предложенные составы растворов и режимы химического осаждения позволили сформировать контактные системы на основе сплавов Ni-P, Co-P. Установлено влияние морфологии поверхности на сопротивление контактов: чем выше шероховатость поверхности, тем больше фактическая площадь контакта и, следовательно, меньше его сопротивление.

Литература

1. Перспективы мировой энергетики до 2040 г. / *А. А. Макаров, А. А. Галкина, Е. В. Грушевенко и др.* // Мировая экономика и международные отношения. 2014. № 1. С. 3–20. EDN: RYFJVN.
2. Повышение эффективности электроэнергетики России / *А. Голяшев, А. Курдин, А. Коломиец и др.* // Энергетический бюллетень [Электронный ресурс]. М.: Аналитический центр при Правительстве РФ, 2021. № 97. URL: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2021/energo_june21.pdf (дата обращения: 20.09.2023).
3. Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ / под общ. ред. *Ю. Ф. Косяка*. М.: Энергоиздат, 1982. 269 с.
4. *Штерн М. Ю.* Многосекционные термоэлементы, преимущества и проблемы их создания // ФТП. 2021. Т. 55. № 12. С. 1105–1114. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.12.51690.02>. – EDN: XBDDBD.
5. Contacts to thermoelectric materials obtained by chemical and electrochemical deposition of Ni and Co / *E. Korchagin, M. Shtern, I. Petukhov et al.* // J. Electron. Mater. 2022. Vol. 51. Iss. 10. P. 5744–5758. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09860-9>
6. *Rhoderick E. H., Williams R. H.* Metal-semiconductor contacts. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1988. 252 p.
7. Pulsed-light surface annealing for low contact resistance interfaces between metal electrodes and bismuth telluride thermoelectric materials / *G. Joshi, D. Mitchell, J. Ruedin et al.* // J. Mater. Chem. C. 2019. Vol. 7. Iss. 3. P. 479–483. <https://doi.org/10.1039/C8TC03147A>
8. *Liu W., Jie Q., Kim H. S., Ren Zh.* Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices // Acta Materialia. 2015. Vol. 87. P. 357–376. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.042>
9. The surface preparation of thermoelectric materials for deposition of thin-film contact systems / *M. Yu. Shtern, I. S. Karavaev, Y. I. Shtern et al.* // Semiconductors. 2019. Vol. 53. P. 1848–1852. <https://doi.org/10.1134/S1063782619130177>
10. *Zhu X., Cao L., Zhu W., Deng Y.* Enhanced interfacial adhesion and thermal stability in bismuth telluride/nickel/copper multilayer films with low electrical contact resistance // Adv. Mater. Interfaces. 2018. Vol. 5. Iss. 23. Art. No. 1801279. <https://doi.org/10.1002/admi.201801279>
11. Thin-film contact systems for thermocouples operating in a wide temperature range / *M. Shtern, M. Rogachev, Yu. Shtern et al.* // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 852. Art. ID: 156889. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156889>
12. *Штерн М. Ю.* Наноструктурированные термоэлектрические материалы для температур 200–1200 К, полученные искровым плазменным спеканием // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 695–706. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-695-706>. – EDN: QVLUDB.
13. *Корнев Р. А., Велиева Ю. В.* Химическое осаждение олова // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 6 (26). С. 33–35. EDN: MUGQXR.

14. Методики исследования электрического контактного сопротивления в структуре металлическая пленка – полупроводник / *М. Ю. Штерн, И. С. Караваяев, М. С. Рогачев и др.* // ФТП. 2022. Т. 56. № 1. С. 31–37. <https://doi.org/10.21883/ФТП.2022.01.51808.24>. – EDN: ZHECUU.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 26.09.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Корчагин Егор Павлович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), eg.ad2013@yandex.ru

Нагрешников Евгений Владимирович – студент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), evgeny1998@yandex.ru

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

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

Мустафоев Бехзод Рустам Узли – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mustafoyev1996@bk.ru

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

References

1. Makarov A. A., Galkina A. A., Grushevenko E. V., Grushevenko D. A., Kulagin V. A., Mitrova T. A., Sorokin S. N. Global energy markets outlook up to 2040. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya = World Economy and International Relations*, 2014, no. 1, pp. 3–20. (In Russian). EDN: RYFJVN.
2. Golyashev A., Kurdin A., Kolomiets A., Skryabina V., Fedorenko D. Increasing the efficiency of Russian electric power industry. *Energeticheskiy byulleten'*. Moscow, Analiticheskiy tsentr pri Pravitel'stve RF Publ., 2021. Iss. 97. (In Russian). Available at: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2021/energo_june21.pdf (accessed: 20.09.2023).
3. Kosyak Yu. F. (gen. ed.). *Steam turbine K-300-240 KhTGZ*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 269 p. (In Russian).
4. Stern M. Yu. Multi-section thermoelements, advantages and problems of their creation. *Semiconductors*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 2098–2106. <https://doi.org/10.21883/SC.2022.14.53847.02>
5. Korchagin E., Shtern M., Petukhov I., Shtern Yu., Rogachev M., Kozlov A., Mustafоеv B. Contacts to thermoelectric materials obtained by chemical and electrochemical deposition of Ni and Co. *J. Electron. Mater.*, 2022, vol. 51, iss. 10, pp. 5744–5758. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09860-9>
6. Rhoderick E. H., Williams R. H. *Metal-semiconductor contacts*. 2nd ed. Oxford, Clarendon Press, 1988. 252 p.
7. Joshi G., Mitchell D., Ruedin J., Hoover K., Guzman R., McAleer M., Wood L., Savoy S. Pulsed-light surface annealing for low contact resistance interfaces between metal electrodes and bismuth telluride thermoelectric materials. *J. Mater. Chem. C*, 2019, vol. 7, iss. 3, pp. 479–483. <https://doi.org/10.1039/C8TC03147A>

8. Liu W., Jie Q., Kim H. S., Ren Zh. Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices. *Acta Materialia*, 2015, vol. 87, pp. 357–376. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.042>
9. Shtern M. Yu., Karavaev I. S., Shtern Yu. I., Kozlov A. O., Rogachev M. S. The surface preparation of thermoelectric materials for deposition of thin-film contact systems. *Semiconductors*, 2019, vol. 53, pp. 1848–1852. <https://doi.org/10.1134/S1063782619130177>
10. Zhu X., Cao L., Zhu W., Deng Y. Enhanced interfacial adhesion and thermal stability in bismuth telluride/nickel/copper multilayer films with low electrical contact resistance. *Adv. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 5, iss. 23, art. no. 1801279. <https://doi.org/10.1002/admi.201801279>
11. Shtern M., Rogachev M., Shtern Yu., Gromov D., Kozlov A., Karavaev I. Thin-film contact systems for thermocouples operating in a wide temperature range. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 852, art. ID: 156889. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156889>
12. Stern M. Yu. Nanostructured thermoelectric materials for temperatures from 200 to 1200 K obtained by spark plasma sintering. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 695–706. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-695-706>. – EDN: QVLUDB.
13. Kornev R. A., Velieva Yu. V. Chemical deposition of tin. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2008, no. 6 (26), pp. 33–35. (In Russian). EDN: MUGQXR.
14. Stern M. Yu., Karavaev I. S., Rogachev M. S., Stern Yu. I., Mustafiev B. R., Korchagin E. P., Kozlov A. O. Methods for investigation of electrical contact resistance in a metal film – semiconductor structure. *Semiconductors*, 2022, vol. 56, no. 1, pp. 24–30. <https://doi.org/10.21883/SC.2022.01.53115.24>

The article was submitted 01.09.2023; approved after reviewing 26.09.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Egor P. Korchagin – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), eg.ad2013@yandex.ru

Evgeny V. Nagreshnikov – Student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), evgeny1998@yandex.ru

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

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

Bekhzod R. Mustafiev – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), mustafiev1996@bk.ru

Yuri I. Shtern – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), hptt@miee.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Научная статья
УДК 004.312.4
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-6-784-793
EDN: HCFELG

Разработка RTL-модели генератора псевдослучайных чисел на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью в каскаде Голлмана

В. А. Соболев^{1,2}, В. В. Лосев¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²ООО «М-Софт», г. Москва, Россия

sobolev.vitali.a@gmail.com

Аннотация. Случайные числа активно используются в машинном обучении, сфере информационной безопасности, математическом моделировании и устройствах Интернета вещей. Генераторы псевдослучайных чисел (ГПСЧ) представляют собой устройства, генерирующие последовательности чисел, свойства которых близки к случайным на определенном периоде. Требования к ГПСЧ возрастают с развитием областей их применения, что вызывает необходимость разработки новых ГПСЧ. В настоящее время среди перспективных ГПСЧ можно выделить ГПСЧ на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью (РСНОС), имеющих повышенную непредсказуемость. В работе предложена RTL-модель ГПСЧ на основе РСНОС для 32-битных систем на кристалле на языке описания аппаратуры Verilog. Проведено исследование статистических свойств данного ГПСЧ. Разработанная RTL-модель ГПСЧ на основе РСНОС состоит из четырех 16-битных РСНОС в каскаде Голлмана, модуля сбора данных с каскада из РСНОС, группы регистров управления и подключения к шине AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) APB (Advanced Peripheral Bus). Статистические свойства разработанного ГПСЧ протестированы с помощью пакета тестирования NIST STS 800-22 и удовлетворяют критериям тестов. Сравнение числа подпоследовательностей, не прошедших наиболее значимые тесты пакета NIST STS 800-22, генераторов из пакета NIST и вихря Мерсенна из состава среды Matlab с разработанным ГПСЧ показало, что последний имеет наименьшее число неудачных подпоследовательностей. По результатам вычисления значения числа π методом Монте-Карло разработанный ГПСЧ имеет меньшее стандартное отклонение и меньшую ошибку сдвига медианы по сравнению с используемым в среде Matlab вихрем Мерсенна.

© В. А. Соболев, В. В. Лосев, 2023

Ключевые слова: генератор псевдослучайных чисел, регистры сдвига с нелинейной обратной связью, каскад Голлмана, RTL-модель, статистические свойства

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-19-00521-П).

Для цитирования: Соболев В. А., Лосев В. В. Разработка RTL-модели генератора псевдослучайных чисел на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью в каскаде Голлмана // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 784–793. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-784-793>. – EDN: HCFELG

Original article

Development of an RTL model of a pseudorandom number generator based on nonlinear feedback shift registers in a Gollmann cascade

V. A. Sobolev^{1,2}, V. V. Losev¹

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²“M-Soft” LLC, Moscow, Russia

sobolev.vitali.a@gmail.com

Abstract. Random numbers are extensively used in machine learning, information security, mathematical modelling and IoT devices. Pseudorandom number generators (PRNGs) are devices that generate sequences of numbers whose properties are close to random at a certain period. Requirements for pseudorandom number generators are increasing with the development of their applications, which necessitates the development of new PRNGs. At present among prospective PRNGs the ones based on nonlinear feedback shift registers (NLFSR) with increased unpredictability can be distinguished. In this work, a developed RTL model of PRNG based on NLFSR for 32-bit systems on a chip in HDL Verilog is proposed. The developed RTL model of PRNG based on NLFSR consists of four 16-bit NLFSR in a Gollmann cascade, a data acquisition module from the NLFSR cascade, a group of control registers and AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) APB (Advanced Peripheral Bus) connection. The statistical properties of this PRNG were tested with the NIST STS 800-22 test suite and meet the test criteria. The comparison of the number of subsequences failing the most significant tests of NIST STS 800-22 suite, of PRNGs from NIST package and of Mersenne twister from Matlab environment with the developed PRNG has demonstrated that the latter has the least number of failed subsequences. According to the results of Monte Carlo calculation of π , the developed PRNG has a smaller standard deviation and median shift error than the Mersenne twister PRNG used in Matlab environment.

Keywords: pseudorandom number generator, nonlinear feedback shift registers, Gollmann cascade, RTL model, statistical properties

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

For citation: Sobolev V. A., Losev V. V. Development of an RTL model of a pseudorandom number generator based on nonlinear feedback shift registers in a Gollmann cascade. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 784–793. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-784-793>. – EDN: HCFELG

Введение. Генераторы случайных и псевдослучайных чисел широко распространены в различных прикладных задачах, таких как математическое моделирование, машинное обучение, криптография. В основе генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ) – алгоритм, формирующий на заданном периоде числа, свойства которых близки к случайным. В настоящее время широкое применение получили алгоритмические ГПСЧ на базе регистров сдвига с обратной связью, в частности регистров сдвига с линейной обратной связью (РСЛОС). Однако РСЛОС линейны и подвержены анализу и взлому, в связи с чем в простой форме они не применяются. Возможным решением данной проблемы могут быть комбинированные генераторы или использование нелинейной функции обратной связи.

Для оценки качества псевдослучайных чисел, производимых ГПСЧ, существуют графические (гистограмма распределения, распределение на плоскости, автокорреляционная функция) и статистические (пакеты статистического тестирования Diehard, NIST STS 800-22 [1]) тесты. Графические тесты позволяют визуально оценить качество случайных чисел при наличии значительных дефектов качества. Статистические тесты дают числовую оценку для ряда статистических свойств, выраженную через значение вероятности P . Для оценки качества ГПСЧ также может быть использован метод Монте-Карло. Точность работы метода зависит от качества используемого ГПСЧ [2].

ГПСЧ на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью. ГПСЧ можно представить как машину состояний, в которой состояниями являются псевдослучайные числа, а итерации алгоритма – переходами между состояниями. Перед началом работы ГПСЧ его необходимо инициализировать начальным состоянием, называемым сидом. ГПСЧ на основе регистров сдвига с обратной связью имеют хорошие статистические свойства и высокое быстродействие, в связи с чем могут быть использованы для постобработки истинно случайных чисел с целью повышения статистических свойств. В основе данного типа ГПСЧ – сдвиговый регистр заданной разрядности N , вычисление функции обратной связи $F(x_i)$ в виде полинома Жегалкина из значений битов данного регистра и запись значения функции $F(x_i)$ в последний бит при сдвиге. При этом первый бит относительно направления сдвига является выходным псевдослучайным битом. От функции обратной связи зависят качество псевдослучайных чисел и период. Для РСЛОС максимальный период составляет $(2^N - 1)$ бит, обеспечивается он при функции обратной связи в виде примитивного полинома. При этом отсутствует значение всех нулей, при котором генератор замыкается на значении всех нулей. Функции обратной связи, обеспечивающие максимальный период, являются примитивными полиномами и имеют следующий вид:

$$F(x_i) = x_0 \oplus g(x_1, x_2, \dots, x_{N-1}).$$

ГПСЧ на основе РСЛОС, наиболее распространенные среди ГПСЧ на базе регистров сдвига с обратной связью, криптографически нестойки. Для повышения стойкости используются различные методы, в том числе увеличивающие период псевдослучайной последовательности. Один из них – объединение в каскад Голлмана (рис. 1), представляющий собой последовательность из k РСЛОС. Тактирование последующего регистра

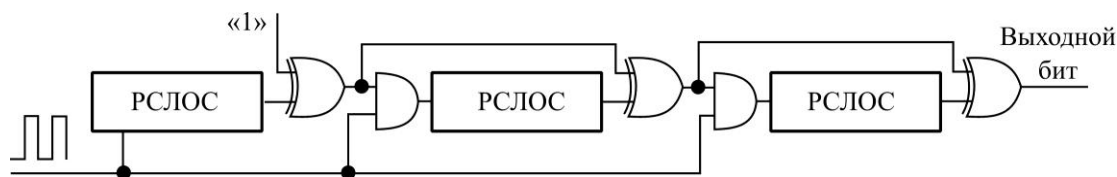


Рис. 1. Каскад Голлмана
Fig. 1. Gollmann cascade

сдвига зависит от выходного значения предыдущего регистра [3]. Выходное значение последнего РСЛОС в каскаде является выходным для всего генератора. При условии, что все регистры сдвига в каскаде имеют одинаковую разрядность N , период выходной последовательности каскада составляет $(2^N - 1)^k$ бит.

В ГПСЧ на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью (РСНОС) по сравнению с ГПСЧ на основе РСЛОС слабо развита теоретическая база, в частности, для нахождения функций обратной связи, обеспечивающих максимальный период. В ряде работ [4–8] рассмотрены разные методы нахождения нелинейных функций обратной связи, обеспечивающих максимальный период. Большинство методов основаны на полном переборе возможных функций с последующей проверкой периода ГПСЧ [5–8].

Для построения математической модели ГПСЧ с целью дальнейшего исследования статистических свойств генератора разработан программный комплекс, аналогичный описанному в работах [5, 6]. Результатом работы комплекса являются функции обратной связи, обеспечивающие максимальный период выходной псевдослучайной последовательности для регистров заданной разрядности. Получен ряд функций обратной связи для регистров разрядности 16 бит, среди которых для последующего проектирования и исследования выбраны четыре функции (табл. 1), одна из которых с линейной сложностью 3 и типом, отличным от исследуемого в работе [6], и три функции новых типов с линейной сложностью 4. Повышенная линейная сложность увеличивает сложность прогнозирования последующих выходных значений на основе текущих, что является одним из показателей степени случайности. Результирующий период составляет порядка $1,8 \cdot 10^{19}$ бит. Структурно разработанный ГПСЧ имеет вид, представленный на рис. 2. Математическая модель ГПСЧ описана на языке Matlab.

Таблица 1
Функции обратной связи 16-битных РСНОС
для каскада Голлмана

Table 1
16-Bits NLFSR feedback functions for Gollmann cascade

Номер 16-битного регистра в каскаде	Функция обратной связи $F(x_i)$
1	$x_0 \oplus x_8 \oplus x_{15} \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_9$
2	$x_0 \oplus x_{10} \oplus x_1 \cdot x_{13} \oplus x_3 \cdot x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{14}$
3	$x_0 \oplus x_7 \oplus x_8 \oplus x_5 \cdot x_7 \cdot x_8 \cdot x_{11}$
4	$x_0 \oplus x_5 \oplus x_7 \oplus x_1 \cdot x_{15} \oplus x_{14} \cdot x_{15} \oplus x_1 \cdot x_6 \cdot x_{12}$

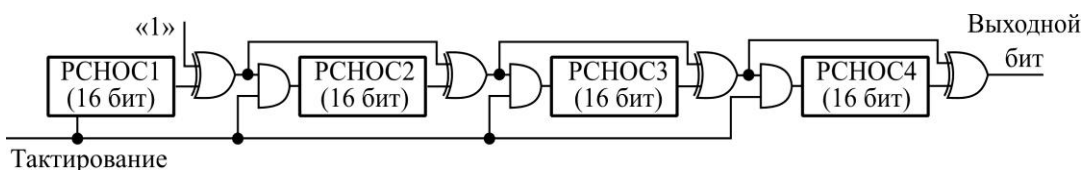


Рис. 2. Структурная схема разработанного ГПСЧ
 Fig. 2. Block diagram of the developed pseudorandom number generator

Исследование характеристик ГПСЧ. Для исследования качества разработанного ГПСЧ используются графические и статистические тесты. Размер выборки для тестирования составляет 4 128 705 бит. Результаты графических тестов приведены на рис. 3. Отсутствие пиков на автокорреляционной функции (помимо центрального, соответствующего наложению копии на изначальную функцию без сдвига) указывает на отсутствие явной корреляции в псевдослучайной последовательности.

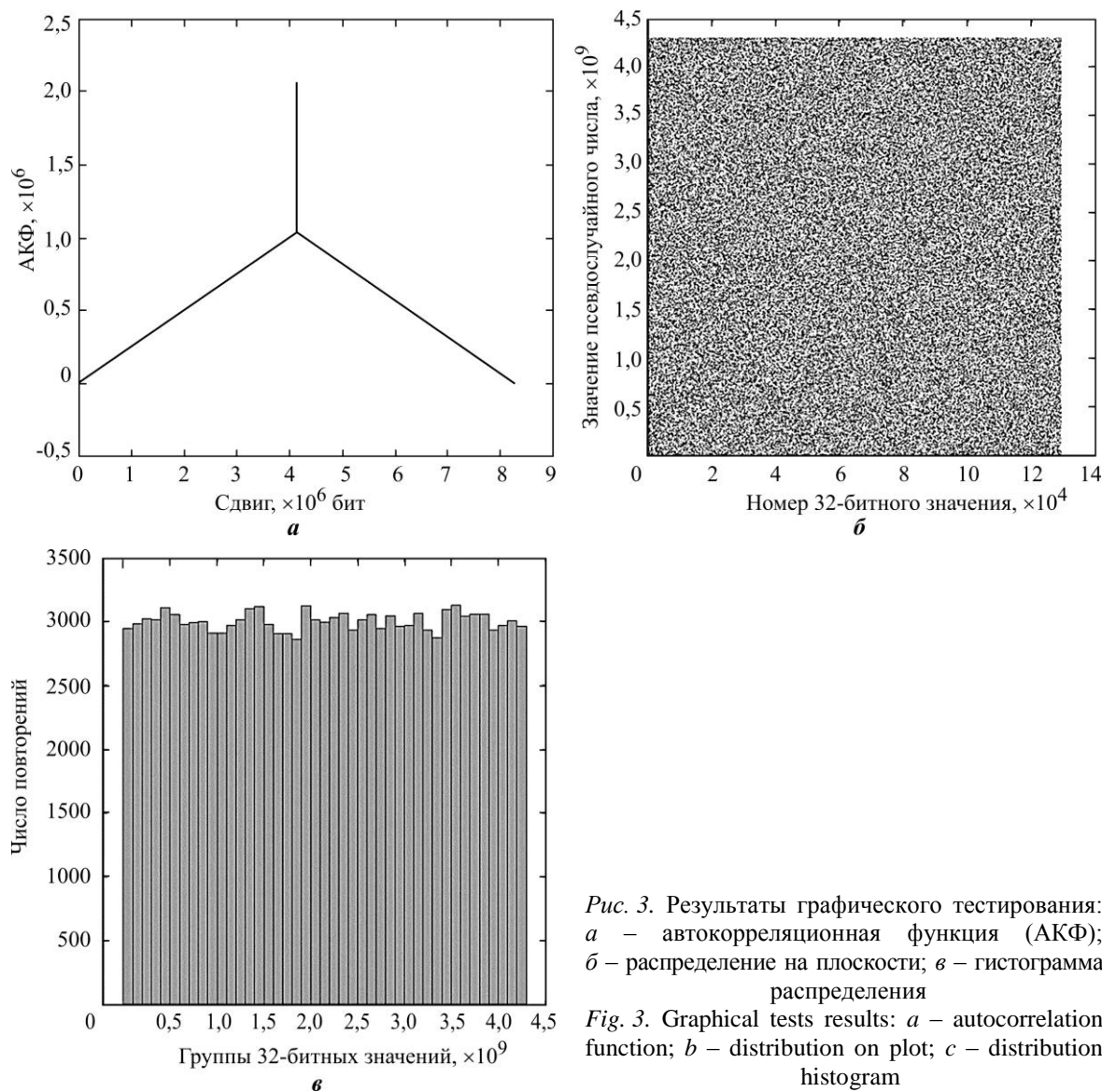


Рис. 3. Результаты графического тестирования:
 а – автокорреляционная функция (АКФ);
 б – распределение на плоскости; в – гистограмма
 распределения
 Fig. 3. Graphical tests results: a – autocorrelation
 function; b – distribution on plot; c – distribution
 histogram

Поскольку рассматриваемая RTL-модель предназначена для использования в 32-битных системах на кристалле, псевдослучайные биты сформированы в 32-битные слова для графических тестов на плоскости и гистограммы распределения. Явных дефектов и отклонений на распределении на плоскости не наблюдается. Распределение чисел на гистограмме не является полностью униморфным, поэтому для более подробной оценки проведено тестирование с помощью пакета статистического тестирования NIST STS 800-22, состоящего из 15 тестов. Цель тестов – выявление дефектов случайности, таких как, например, отклонения в соотношении 0 и 1 в последовательности (частотный тест), малая степень энтропии (тест на приближительную энтропию) и др. [1]. Критерием успешного прохождения тестов является превышение вычисляемого значения вероятности P (P -value) уровня значимости $\alpha = 0,01$. По результатам тестирования разработанная модель удовлетворяет требованиям к статистическим свойствам.

Дополнительно проведено сравнение количества неудачных подпоследовательностей в рамках последовательности, сгенерированной разработанным ГПСЧ, с количеством неудачных подпоследовательностей в рамках последовательностей, сгенерированных другими ГПСЧ, такими как LCG, QCG I, QCG II, MODEXPG из состава пакета NIST и вихрь Мерсенна, используемый в качестве ГПСЧ по умолчанию в среде Matlab. Сравнение осуществлено с использованием наиболее значимых тестов – 4, 1, 3, 12 и 2 [9]. Величина выборки составляет 2 194 304 бит, она состоит из 32 подпоследовательностей, каждая размером 131 072 бит. Подсчитано количество не прошедших тестирование подпоследовательностей (табл. 2). Номера тестов приведены в порядке уменьшения их значимости.

Таблица 2

Подпоследовательности различных генераторов, не прошедших наиболее значимые тесты пакета NIST STS 800-22

Table 2

Subsequences of various generators that failed the most significant tests of the NIST STS 800-22 test suite

Номер теста	LCG	QCG I	QCG II	MODEXPG	Вихрь Мерсенна	Разработанный ГПСЧ
4	0	2	0	2	0	0
1	4	2	0	0	0	0
3	6	2	2	2	2	1
12	0	3	1	2	2	1
2	0	0	0	0	0	0

Наибольшее количество не прошедших тестирование подпоследовательностей имеют линейный конгруэнтный генератор LCG и квадратичный конгруэнтный генератор QCG I, наименьшее – вихрь Мерсенна из среды Matlab и квадратичный конгруэнтный генератор QCG II. Разработанная модель генератора на основе четырех 16-битных РСНОС в каскаде Голлмана показала наилучшие результаты с точки зрения числа неудачных подпоследовательностей. Применение каскада Голлмана в разработанном генераторе, помимо увеличения периода, снижает восприимчивость ГПСЧ к шаблонам и смещениям, которые определяются с помощью статистических тестов, а входящие в состав каскада РСНОС обеспечивают повышенную степень непредсказуемости за счет нелинейности функций обратной связи.

Для сравнения вихря Мерсенна из среды Matlab и разработанного ГПСЧ проведено моделирование значения числа π методом Монте-Карло [10] при использовании данных генераторов. Подсчитано количество случайно расположенных точек, принадлежащих кругу единичного радиуса (для 100, 1000, 10 000 и 100 000 точек). Каждое вычисление повторяется несколько раз. Результаты проведенного моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты вычисления значения числа π методом Монте-Карло

Table 3

Results of calculating π value using the Monte Carlo method

Число точек	Число повторений	Вихрь Мерсенна		Разработанный ГПСЧ	
		Медиана	Стандартное отклонение	Медиана	Стандартное отклонение
100	10 000	3,1600	0,1645	3,1600	0,1645
1000	1000	3,1440	0,0515	3,1440	0,0523
10 000	100	3,1420	0,0153	3,1419	0,0139
100 000	10	3,1402	0,0073	3,1422	0,0030

Согласно полученным результатам стандартное отклонение разработанной модели с увеличением числа точек (т. е. с повышением точности вычисления) меньше, чем у вихря Мерсенна. Разработанный ГПСЧ имеет в 1–2,5 раза меньшее стандартное отклонение и примерно в 1–1,6 раза меньшую ошибку сдвига медианы, что свидетельствует о большей равномерности псевдослучайных чисел.

RTL-модель ГПСЧ на основе РСНОС. Исследованная математическая модель ГПСЧ используется как часть RTL-модели блока ГПСЧ. Блок подключается как ведомое устройство к 32-битной шине AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) APB (Advanced Peripheral Bus). Блок-схема модели приведена на рис. 4. Блок состоит из модуля ГПСЧ на основе четырех 16-битных РСНОС в каскаде Голлмана, модуля сбора данных, управляющих и статусных регистров и модуля, реализующего подключение к шине AMBA APB.

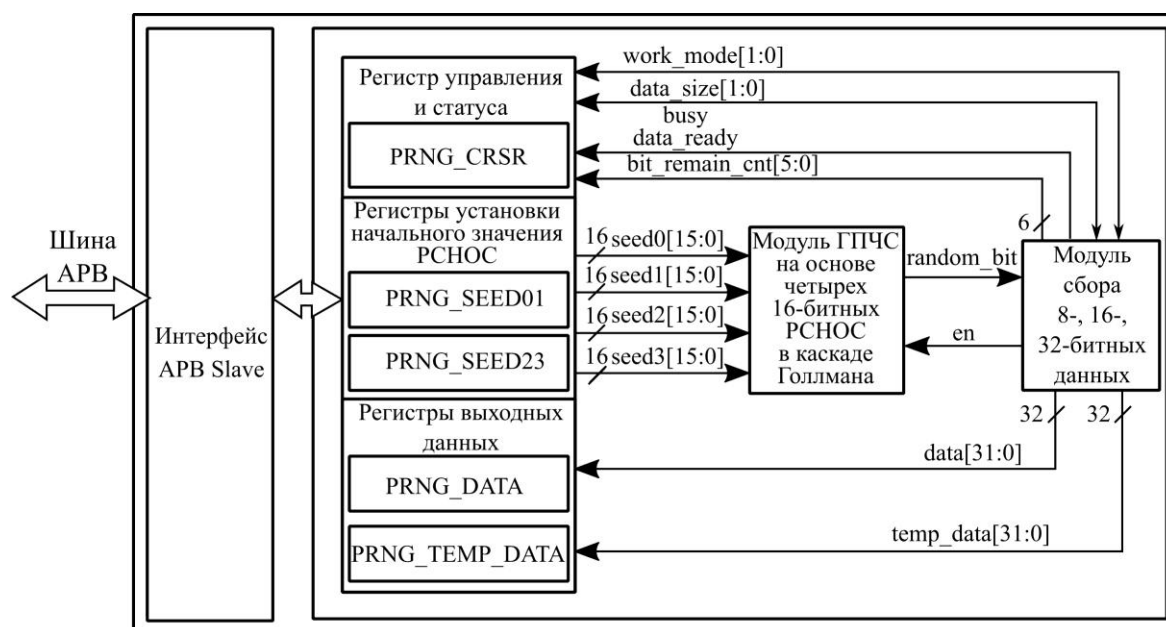


Рис. 4. Блок-схема RTL-модели ГПСЧ на основе РСНОС

Fig. 4. Block diagram of shift register with nonlinear feedback based pseudorandom number generator RTL model

Модуль ГПСЧ на основе четырех 16-битных РСНОС в каскаде Голлмана имеет четыре входных 16-разрядных шины $seed0[15:0]$ – $seed3[15:0]$ для установки сидов регистров сдвига в каскаде и управляющий сигнал en , разрешающий генерацию псевдослучайных битов (является разрешающим сигналом для частоты тактирования регистров сдвига). Запись сидов может осуществляться непосредственно в процессе генерации псевдослучайного бита и применяется с задержкой в один такт.

Модуль сбора данных накапливает псевдослучайные биты с модуля ГПСЧ. В зависимости от настроек (устанавливаемых линиями $data_size[1:0]$) осуществляется сбор 8-, 16- или 32-битных данных. При смене режима разрядности накопленное на данный момент число не сбрасывается, а дополняется в случае увеличения собираемой разрядности или маскируется по младшим разрядам при уменьшении собираемой разрядности. Параллельно выводится промежуточный результат (шина $temp_data[31:0]$). В процессе работы модуль формирует сигналы занятости – $busy$ (модуль находится в процессе сбора псевдослучайного числа), готовности – $ready$ (псевдослучайное число собрано) и число оставшихся битов до сбора (шина $bit_remain_cnt[5:0]$). В модуле реализованы четыре режима сбора данных (управляется шиной $work_mode[1:0]$): модуль остановлен, сбор одиночного числа, циклический сбор по чтению собранных данных и непрерывный сбор.

Управляющие и статусные регистры подключены к шине APB и внутренним модулям. Данные регистры позволяют читать собранные и промежуточные псевдослучайные числа, читать состояние занятости и готовности модуля сбора данных в процессе сбора псевдослучайного числа, а также управлять режимом сбора, разрядностью собираемых данных и сидами РСНОС в каскаде Голлмана. Управление модулем ведущими устройствами осуществляется по шине APB через данные управляющие и статусные регистры.

Заключение. Разработанная математическая модель ГПСЧ на основе четырех 16-битных РСНОС в каскаде Голлмана успешно протестирована с помощью графических тестов и пакета статистического тестирования NIST STS 800-22. По результатам сравнения количества подпоследовательностей, сгенерированных разными ГПСЧ и не прошедших наиболее значимые тесты пакета NIST STS 800-22, и вычисления значения числа π методом Монте-Карло разработанная модель имеет наименьшее количество не прошедших тестирование подпоследовательностей по сравнению с ГПСЧ LCG, QCG I, QCG II, MODEXP из состава пакета NIST и вихрем Мерсенна, используемым в качестве ГПСЧ по умолчанию в среде Matlab, а также в 1–2,5 раза точнее с точки зрения стандартного отклонения и примерно в 1–1,6 раза с точки зрения значения ошибки сдвига медианы по сравнению с используемым в Matlab вихрем Мерсенна. На основе описанной на языке Matlab математической модели ГПСЧ на базе РСНОС разработана RTL-модель 32-битного блока ГПСЧ с подключением к шине AMBA APB.

Разработанная модель ГПСЧ на основе РСНОС обеспечивает генерацию униморфных статистически независимых псевдослучайных чисел и может быть использована как периферийный блок в системах на кристалле в качестве источника псевдослучайных чисел.

Литература

1. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications: NIST special publ. 800-22 rev. 1a / *A. Rukhin, J. Soto, J. Nechvatal et al.* // National Institute of Standards and Technology (NIST) [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-22r1a> (дата обращения: 20.08.2023).
2. *Аникин И. В., Альнаджар Х. Х.* Оценка качества работы генератора псевдослучайных чисел, основанного на нечеткой логике, с помощью метода Монте-Карло // *Информация и безопасность.* 2017. Т. 20. № 3 (4). С. 444–447. EDN: ZWPCWD.

3. Gollmann D., Chambers W. G. Clock-controlled shift registers: A review // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1989. Vol. 7. No. 4. P. 525–533. <https://doi.org/10.1109/49.17716>
4. Dubrova E. A list of maximum-period NLFSRs // *Cryptology ePrint Archive* [Электронный ресурс]. 2012/166. URL: <http://eprint.iacr.org/2012/166> (дата обращения: 20.08.2023).
5. Almuhammadi S., Al-Hejri I., Talib G. B., Gaamel A. NLFSR functions with optimal periods // *Computational Science and Its Applications – ICSSA 2018*. Cham: Springer, 2018. P. 67–79. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95162-1_5
6. Al-Hejri I., Almuhammadi S. Constructing new NLFSR functions with optimal periods // *International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)*. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 71–80.
7. Augustynowicz P., Kanciak K. Scalable method of searching for full-period nonlinear feedback shift registers with GPGPU: New list of maximum period NLFSRs // *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2018. Vol. 64. Iss. 2. P. 167–171.
8. Dąbrowski P., Łabuzek G., Rachwałik T., Szmidt J. Searching for nonlinear feedback shift registers with parallel computing // *Information Processing Letters*. 2014. Vol. 114. Iss. 5. P. 268–272. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2013.12.002>
9. Аникин И. В., Альнаджар Х. Х., Кирпичников А. П. Исследование параметров генератора псевдослучайных чисел, основанного на нечеткой логике // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 12. С. 124–127. EDN: WCFKFZ.
10. Williamson T. Calculating pi using the Monte Carlo method // *The Physics Teacher*. 2013. Vol. 51. Iss. 8. P. 468–469. <https://doi.org/10.1119/1.4824938>

Статья поступила в редакцию 22.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 09.06.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Соболев Виталий Александрович – аспирант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «М-Софт» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5), sobolev.vitali.a@gmail.com

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, профессор, 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

References

1. Rukhin A., Soto J., Nechvatal J., Smid M., Barker E., Leigh S., Levenson M., Vangel M. et al. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications, NIST special publ. 800-22 rev. 1a. *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. Available at: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-22r1a> (accessed: 20.08.2023).
2. Anikin I. V., Alnajjar K. Quality estimation of pseudo-random number generator based on fuzzy logic with using Monte-Carlo method. *Informaciya i bezopasnost' = Information and security*. 2017. vol. 20. no. 3 (4). pp. 444–447. (In Russian). EDN: ZWPCWD.
3. Gollmann D., Chambers W. G. Clock-controlled shift registers: A review. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1989, vol. 7, no. 4, pp. 525–533. <https://doi.org/10.1109/49.17716>
4. Dubrova E. A list of maximum-period NLFSRs. *Cryptology ePrint Archive*. 2012/166. Available at: <http://eprint.iacr.org/2012/166> (accessed: 20.08.2023).
5. Almuhammadi S., Al-Hejri I., Talib G. B., Gaamel A. NLFSR functions with optimal periods. *Computational Science and Its Applications – ICSSA 2018*. Cham, Springer, 2018, pp. 67–79. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95162-1_5
6. Al-Hejri I., Almuhammadi S. Constructing new NLFSR functions with optimal periods. *International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)*, 2020, vol. 12, iss. 2, pp. 71–80.
7. Augustynowicz P., Kanciak K. Scalable method of searching for full-period nonlinear feedback shift registers with GPGPU: New list of maximum period NLFSRs. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2018, vol. 64, no. 2, pp. 167–171.

8. Dąbrowski P., Łabuzek G., Rachwalik T., Szmidi J. Searching for nonlinear feedback shift registers with parallel computing. *Information Processing Letters*, 2014, vol. 114, iss. 5, pp. 268–272. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2013.12.002>

9. Anikin I. V., Alnajjar Kh., Kirpichnikov A. P. Studying the parameters of pseudo-random number generator based on fuzzy logic. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2016, vol. 19, no. 12, pp. 124–127. (In Russian). EDN: WCFKFZ.

10. Williamson T. Calculating pi using the Monte Carlo method. *The Physics Teacher*, 2013, vol. 51, iss. 8, pp. 468–469. <https://doi.org/10.1119/1.4824938>

The article was submitted 22.05.2023; approved after reviewing 09.06.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Vitaly A. Sobolev – PhD student of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K. A. Valiev, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, “M-Soft” LLC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5), sobolev.vitali.a@gmail.com

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

ОПЕЧАТКИ

В журнале «Известия вузов. Электроника» 2023, том 28, № 4 допущены опечатки.

В статье «Программно-аппаратный комплекс для ускорения функциональной верификации систем на кристалле» авторов: Солодовников А. П., Переверзев А. Л., Силантьев А. М. после ключевых слов на стр. 441 следует читать:

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 64ГУРЭС14/72780 от 28.12.2021).

Влияние потерь в соединениях при измерении коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра

Т. Ю. Крупкина¹, В. В. Лосев¹, С. Б. Беневоленский²,
А. И. Хлыбов¹, Д. В. Родионов¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт – Республиканский
исследовательский научно-консультационный центр экспертизы,
г. Москва, Россия

dsd@miee.ru

Аннотация. При измерении коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра тестируемое устройство, как правило, соединяется с источником шума и измерительным прибором с помощью коаксиальных волноводов и адаптеров, которые вносят определенные потери, влияющие на результаты измерений. Особенно это актуально при измерениях, проводимых на кристаллах интегральных микросхем в составе пластины, когда для соединения исследуемого объекта с измерительной системой необходимо использовать СВЧ-зонды, коаксиальные кабели и различные соединители. В работе проанализировано влияние потерь в соединениях на результаты измерения коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра методом Y-фактора. Показано, что измеренное значение коэффициента усиления исследуемого объекта меньше реального значения на сумму потерь в соединениях между источником шума с объектом и объектом с анализатором спектра. Установлено, что коэффициент шума не зависит от потерь между исследуемым объектом и измерительным прибором и измеренное значение больше реального на величину потерь в соединениях между источником шума и объектом.

Ключевые слова: коэффициент шума, Y-фактор, температура шума, таблица ENR

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-19-00771).

Для цитирования: Влияние потерь в соединениях при измерении коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра / Т. Ю. Крупкина, В. В. Лосев, С. Б. Беневоленский и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 794–801. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-794-801>. – EDN: SSKNRQ.

Original article

Influence of cable loss on gain and noise figure measured using spectrum analyzer

T. Yu. Krupkina¹, V. V. Losev¹, S. B. Benevolenskiy²,
A. I. Khlybov¹, D. V. Rodionov¹

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow,
Russia

²Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects
Evaluation and Consulting Services, Moscow, Russia

dsd@miee.ru

Abstract. During gain and noise figure measurement, a device under test is customarily connected to noise source and measuring equipment using coaxial waveguides and adaptors that have losses affecting measured results. It is particularly important for on-wafer measurements when semiconductor die should be connected to measuring system using microwave sounding units, coaxial cables and various connectors. In this work, the influence of cable loss on gain and noise figure measurement results obtained using signal analyzer and Y-factor method is analyzed. It was demonstrated that measured value of gain figure of device under test is less than real value by sum of cable losses in noise source connection to device under test and in device under test connection to signal analyzer. It has been established that noise figure is independent of loss between device under test and measuring equipment and measured value is more than real value by connection losses between noise source and device under test.

Keywords: noise figure, Y-factor, noise temperature, excess noise ratio, ENR

Funding: the work has been supported by Russian Scientific Foundation (grant no. 23-19-00771).

For citation: Krupkina T. Yu., Losev V. V., Benevolenskiy S. B., Khlybov A. I., Rodionov D. V. Influence of cable loss on gain and noise figure measured using spectrum analyzer. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 794–801. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-794-801>. – EDN: SSKNRQ.

Введение. Коаксиальные волноводы и адаптеры, с помощью которых тестируемое устройство соединяется с источником шума и измерительным прибором, вносят потери, которые влияют на результаты, полученные при измерении коэффициента шума и усиления. При измерениях, проводимых на кристаллах интегральных микросхем в составе пластины, для соединения исследуемого объекта с измерительной системой используются СВЧ-зонды, коаксиальные кабели и различные соединители. В связи с этим анализ влияния потерь в соединениях на результаты измерения коэффициентов усиления и шума – актуальная задача.

Метод Y-фактора для измерения шумов. Рассмотрим измерение коэффициентов усиления и шума методом Y-фактора [1–6]. Данный метод интегрирован в программное обеспечение широкополосных автоматизированных многофункциональных приборов (анализаторов спектра), предназначенных для определения коэффициента шума.

Полное измерение коэффициентов шума и усиления методом Y-фактора с коррекцией осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится калибровка анализатора спектра. Калиброванный источник шума, содержащий таблицу ENR (Excess Noise Ratio), необходимо подключить к входу прибора. В прибор вводят таблицу ENR в необходимых точках частотного диапазона согласно модели источника шума. После того как таблица ENR загружена в память, прибор для измерения коэффициента шума включает и выключает источник шума и измеряет значения мощностей P_0^{on} и P_0^{off} . Известно, что мощность прямо пропорциональна температуре шума. Следовательно, Y-фактор будет иметь вид

$$Y = P_0^{on} / P_0^{off} = T^{on} / T^{off}, \quad (1)$$

где T^{on} – физическая температура; T^{off} – температура, полученная на основе таблицы ENR.

Если собственная температура шума измерительного прибора (второй каскад) T_2 , то в соответствии с уравнением (1) Y-фактор, измеренный с помощью подключения источника шума (как показано выше) к входу прибора, будет равен:

$$Y_2 = P_0^{on} / P_0^{off} = (T_s^{on} + T_2) / (T_s^{off} + T_2)$$

или

$$T_2 = (T_s^{on} - Y_2 T_s^{off}) / (Y_2 - 1), \quad (2)$$

где T_s^{off} – физическая температура источника шума; T_s^{on} – температура, полученная на основе таблицы ENR, строго определенной для источника шума производителем, из уравнения

$$ENR(\text{дБ}) = 10 \log_{10} [(T_s^{on} - T_s^{off}) / T_0],$$

где $T_0 = 290$ К.

По окончании калибровочного процесса анализатор спектра сохраняет измеренные значения P_0^{on} и P_0^{off} и вычисленные значения Y_2 и T_2 . Далее измерительный прибор выводит осциллограммы коэффициентов усиления и шума на номинальное значение 0 дБ.

На втором этапе измерения происходит включение тестируемого устройства между источником шума и прибором и проводится повторное измерение методом Y-фактора. Измерительная система состоит из исследуемого устройства (первый каскад) и измерительного прибора (второй каскад) (рис. 1).

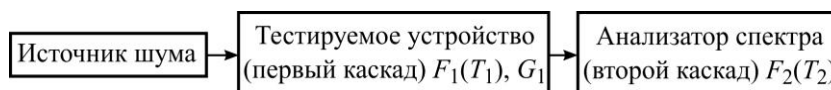


Рис. 1. Блок-схема измерения коэффициентов шума F_1 и усиления G_1 (F_2 – коэффициент шума измерительного устройства)

Fig. 1. Abstract circuit for noise figure F_1 and gain G_1 measurements (F_2 – measurement device noise figure)

Общий Y-фактор всей системы определяется как

$$Y_{12} = P_{12}^{on} / P_{12}^{off}.$$

Аналогично уравнению (2) общая температура шума системы T_{12} равна:

$$T_{12} = (T_s^{on} - Y_{12} T_s^{off}) / (Y_{12} - 1).$$

Поскольку измерительный прибор содержит значения P_{12}^{on} и P_{12}^{off} , а также сохраненные значения P_0^{on} и P_0^{off} , он может определить коэффициент усиления тестируемого устройства:

$$G_1 = (P_{12}^{on} - P_{12}^{off}) / (P_0^{on} - P_0^{off}). \quad (3)$$

Обычно G_1 отображается анализатором спектра в децибелах: $G_1(\text{дБ}) = 10 \log_{10} G_1$.

Таким образом, прибор определил значения T_2 , T_{12} и G_1 . Далее, используя численные значения указанных параметров, прибор определяет температуру шума T_1 исследуемого устройства с учетом коррекции коэффициента шума самого прибора (анализатора спектра): $T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$ и коэффициент шума: $F_1 = 1 + T_1 / 290$.

Применение метода Y-фактора для измерения приборов на пластине. Тестируемое устройство чаще всего соединяют с источником шума и измерительным прибором с помощью коаксиальных волноводов и адаптеров, которые вносят потери, влияющие на результаты измерений коэффициентов усиления и шума. Это в первую очередь актуально при исследовании кристаллов на пластине, когда для соединения объекта с измерительной системой применяются СВЧ-зонды, коаксиальные кабели и различные соединители (рис. 2) [7–11]. Рассмотрим влияние этих потерь на результаты измерения коэффициента усиления.

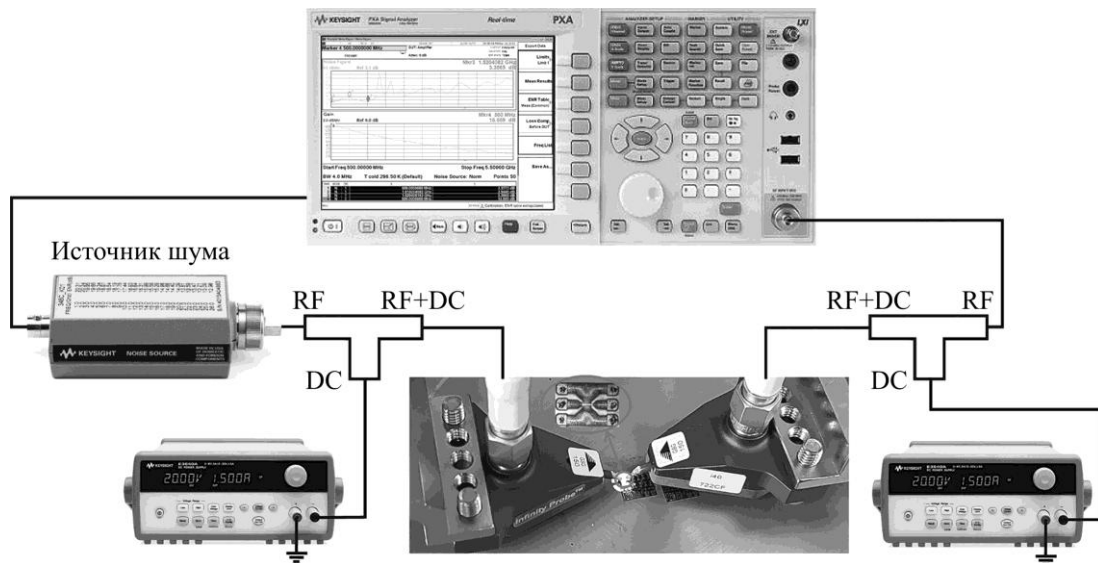


Рис. 2. Схема стенда измерений коэффициентов шума и усиления для кристаллов на пластине (RF – переменный сигнал; DC – постоянный сигнал)

Fig. 2. Measurement test bench scheme for noise figure and gain on-wafer measurements (RF – sinusoidal signal; DC – constant signal)

Как видно из выражения (3), прибор вычисляет коэффициент усиления тестируемого устройства по результатам измерения мощности при выключенном и включенном источнике шума. В первом случае – без тестируемого устройства на этапе калибровки, во втором – с тестируемым устройством. На этапе калибровки

$$\begin{aligned} P_0^{off} &= kT_0 B(1 + \Delta T / T_0), \\ P_0^{on} &= kT_0 B(1 + \Delta T / T_0 + ENR), \end{aligned} \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана; B – полоса частот; $\Delta T = T_s - T_0$.

В выражении (4) мощности получены на оптимальной (согласованной) нагрузке, равной 50 Ом. После включения тестируемого устройства

$$P^{off} = [kT_0B(1 + \Delta T / T_0)G + N_{dut}]S_1,$$

$$P^{on} = [kT_0B(1 + \Delta T / T_0 + ENR \cdot S_1)G + N_{dut}]S_2,$$

где G – коэффициент усиления для исследуемого устройства; N_{dut} – шумовая мощность, генерируемая исследуемым объектом; S_1 – коэффициент потерь в кабелях, зондах и переходниках между источником шума и измерительным прибором; S_2 – коэффициент потерь в кабелях, зондах и переходниках между исследуемым устройством и анализатором спектра.

Следует отметить, что исследуемое устройство должно быть согласовано по входу с источником шума, а по выходу – с измерительной системой. Тогда в соответствии с выражением (3) вычисляемый прибором коэффициент усиления G_1 будет равен:

$$G_1 = \frac{P^{on} - P^{off}}{P_0^{on} - P_0^{off}} =$$

$$= \frac{[kT_0B(1 + \Delta T / T_0 + ENR \cdot S_1)G + N_{DUT}]S_2 - [kT_0B(1 + \Delta T / T_0)G + N_{dut}]S_2}{kT_0B(1 + \Delta T / T_0 + ENR) - kT_0B(1 + \Delta T / T_0)}.$$
(5)

Разделив числитель и знаменатель в выражении (5) на kT_0B , получим

$$G_1 = \frac{GS_2(ENR \cdot S_1)}{ENR} = GS_1S_2.$$

Отсюда $G(\text{дБ}) = G_1(\text{дБ}) - S_1(\text{дБ}) - S_2(\text{дБ})$.

Рассмотрим влияние потерь в соединениях на результаты измерения коэффициента шума. Для этого воспользуемся следующим выражением для коэффициента шума [12–15]:

$$F = ENR / (Y - 1).$$
(6)

При выключенном источнике шума измеряемая мощность равна:

$$P^{off} = [kT_0B(1 + \Delta T / T_0)G + N_{dut}]S_2 = P_{dut}^{off} S_2,$$

а при включенном источнике шума

$$P^{on} = [kT_0B(1 + \Delta T / T_0 + ENRS_1)G + N_{dut}]S_2 = P_{dut}^{on} S_2.$$

Здесь P_{dut}^{off} и P_{dut}^{on} – значения выходной и входной мощности тестируемого устройства без потерь в соединении между тестируемым устройством и измерителем.

Определим значение Y -фактора:

$$Y = P^{on} / P^{off} = P_{dut}^{on} S_2 / P_{dut}^{off} S_2 = P_{dut}^{on} / P_{dut}^{off} = Y_{dut},$$

где Y_{dut} – Y -фактор тестируемого устройства при $ENR_{dut} = ENR \cdot S_1$.

Тогда, используя выражение (6), получаем

$$F_{dut} = ENR_{dut} / (Y_{dut} - 1) = ENR \cdot S_1 / (Y_{dut} - 1) = ENR \cdot S_1 / (Y - 1) = FS_1,$$

где F_{dut} – коэффициент шума тестируемого устройства; F – коэффициент шума, измеренный прибором.

Таким образом, $F_{dut}(\text{дБ}) = F(\text{дБ}) + S_1(\text{дБ})$ и не зависит от потерь между тестируемым устройством и анализатором спектра.

Заключение. Анализ влияния потерь в соединениях на результаты измерения коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра методом Y-фактора показал следующее. Измеренное значение коэффициента усиления тестируемого устройства меньше реального значения на сумму потерь в соединениях между источником шума с устройством и устройством с анализатором спектра. Измеренное значение коэффициента шума больше реального на величину потерь в соединениях между источником шума и устройством и не зависит от потерь между исследуемым устройством и анализатором спектра.

Литература

1. Noise figure measurement accuracy: The Y-factor method: application note // Keysight Technologies [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06829/application-notes/5952-3706.pdf> (дата обращения: 29.06.2018).
2. Microwave linear characterization procedures of on-wafer scaled GaAs pHEMTs for low-noise applications / *A. Caddemi, E. Cardillo, G. Crupi et al.* // *Electronics*. 2019. Vol. 8. Iss. 11. Art. No. 1365. <https://doi.org/10.3390/electronics8111365>
3. *Jimenez C.* Noise figure measurement with Y-factor and cold source method: technical report, Oct. 2020 / Laboratory 1 Noise & Interference, University of Limoges // Researchgate [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/345149983_Noise_figure_Measurement_with_Y-Factor_and_cold_source_method_Laboratory_1_Noise_Interferences (дата обращения: 25.08.2023).
4. *Leffel M., Daniel R.* The Y-factor technique for noise figure measurements: application note v. 5e, 2021 // Rohde & Schwarz [Электронный ресурс]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/the-y-factor-technique-for-noise-figure-measurements-application-note_56280-15484.html (дата обращения: 28.08.2023).
5. *Ogunlade M. A., Gbadamosi S. L., Owolabi I. E., Nwulu N. I.* Noise measurement, characterization, and modeling for broadband indoor power communication system: A comprehensive survey // *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 3. Art. No. 1535. <https://doi.org/10.3390/en16031535>
6. *Chen C.-H.* Thermal noise measurement and characterization for modern semiconductor devices // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2021. Vol. 24. Iss. 2. P. 60–71. <https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9400958>
7. *Беневоленский С. Б., Метёлкин Е. В., Четвериков Н. И., Четверикова И. Ф.* Физические основы работы полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2003. 340 с. EDN: TIPLZV.
8. *Grasser T.* Noise in nanoscale semiconductor devices. Cham: Springer, 2020. VI, 729 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37500-3>
9. *Kazan O.* GaN-based robust low-noise amplifier: diss. for the MSc (Electr. and Electron. Eng.). Ankara, 2018. XVIII, 92 p.
10. *Bandyopadhyay P. K., Biswas A., Bhattacharjee A. K., Acharyya A.* Influence of carrier–carrier interactions on the noise performance of millimeter-wave IMPATTs // *IETE Journal of Research*. 2019. Vol. 65. Iss. 4. P. 515–522. <https://doi.org/10.1080/03772063.2018.1433078>
11. Effect of phase noise on the optical millimeter-wave signal in the DWDM-RoF system / *R. M. Mahmood, S. Yaakob, F. A. Ahmad et al.* // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Iss. 3. Art. No. 489. <https://doi.org/10.3390/electronics11030489>
12. *Бельчиков С.* Коэффициент шума. Теория и практика измерений // *Компоненты и технологии*. 2008. № 4 (81). С. 196–199. EDN: MTKDDR.
13. Design and validation of 100 nm GaN-on-Si Ka-band LNA based on custom noise and small-signal models / *L. Pace, S. Colangeli, W. Ciccognani et al.* // *Electronics*. 2020. Vol. 9. Iss. 1. Art. No. 150. <https://doi.org/10.3390/electronics9010150>

14. Millimeter-wave avalanche noise sources based on p-i-n diodes in 130 nm SiGe BiCMOS technology: Device characterization and CAD modeling / *F. Alimenti, G. Simoncini, G. Brozzetti et al.* // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 178976–178990. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027384>

15. *Kebe M., Sanduleanu M.* A low-phase-noise 8 GHz linear-band sub-millimeter-wave phase-locked loop in 22 nm FD-SOI CMOS // *Micromachines*. 2023. Vol. 14. Iss. 5. Art. No. 1010. <https://doi.org/10.3390/mi14051010>

Статья поступила в редакцию 15.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 17.07.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Крупкина Татьяна Юрьевна – доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), krupkina@dsd.miee.ru

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, профессор, 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

Беневоленский Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института – Республиканского исследовательского научно-консультационного центра экспертизы (Россия, 127055, г. Москва, ул. Образцова, 12, корп. 2), sbb640@gmail.com

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 имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), denis.rodionov@gmail.com

References

1. Noise figure measurement accuracy: The Y-factor method, application note. *Keysight Technologies*. Available at: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06829/application-notes/5952-3706.pdf> (accessed: 29.06.2018).

2. Caddemi A., Cardillo E., Crupi G., Boglione L., Roussos J. Microwave linear characterization procedures of on-wafer scaled GaAs pHEMTs for low-noise applications. *Electronics*, 2019, vol. 8, iss. 11, art. no. 1365. <https://doi.org/10.3390/electronics8111365>

3. Jimenez C. Noise figure measurement with Y-factor and cold source method, technical report, Oct. 2020. *Researchgate*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/345149983_Noise_figure_Measurement_with_Y-Factor_and_cold_source_method_Laboratory_1_Noise_Interferences (accessed: 25.08.2023).

4. Leffel M., Daniel R. The Y-factor technique for noise figure measurements, application note v. 5e, 2021. *Rohde & Schwarz*. Available at: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/the-y-factor-technique-for-noise-figure-measurements-application-note_56280-15484.html (accessed: 28.08.2023).

5. Ogunlade M. A., Gbadamosi S. L., Owolabi I. E., Nwulu N. I. Noise measurement, characterization, and modeling for broadband indoor power communication system: A comprehensive survey. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 3, art. no. 1535. <https://doi.org/10.3390/en16031535>

6. Chen C.-H. Thermal noise measurement and characterization for modern semiconductor devices. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2021, vol. 24, iss. 2, pp. 60–71. <https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9400958>

7. Benevolenskiy S. B., Metelkin E. V., Chetverikov N. I., Chetverikova I. F. *Principal physics of semiconductor devices operation*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 340 p. (In Russian). EDN: TIPLZV.
8. Grasser T. *Noise in nanoscale semiconductor devices*. Cham, Springer, 2020. vi, 729 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37500-3>
9. Kazan O. *GaN-based robust low-noise amplifier*, diss. for the MSc (Electr. and Electron. Eng.). Ankara, 2018. xviii, 92 p.
10. Bandyopadhyay P. K., Biswas A., Bhattacharjee A. K., Acharyya A. Influence of carrier–carrier interactions on the noise performance of millimeter-wave IMPATTs. *IETE Journal of Research*, 2019, vol. 65, iss. 4, pp. 515–522. <https://doi.org/10.1080/03772063.2018.1433078>
11. Mahmood R. M., Yaakob S., Ahmad F. A., Anas S. B. A., Zamzuri M. A. K., Rashidi C. B. M. Effect of phase noise on the optical millimeter-wave signal in the DWDM-RoF system. *Electronics*, 2022, vol. 11, iss. 3, art. no. 489. <https://doi.org/10.3390/electronics11030489>
12. Bel'chikov S. Noise figure. Theory and practice of measurement. *Komponentiy i tekhnologii = Components & Technologies*, 2008, no. 4 (81), pp. 196–199. (In Russian). EDN: MTKDDR.
13. Pace L., Colangeli S., Ciccognani W., Longhi P. E., Limiti E., Leblanc R., Feudale M., Vitobello F. Design and validation of 100 nm GaN-on-Si Ka-band LNA based on custom noise and small-signal models. *Electronics*, 2020, vol. 9, iss. 1, art. no. 150. <https://doi.org/10.3390/electronics9010150>
14. Alimenti F., Simoncini G., Brozzetti G., Maistro D. D., Tiebout M. Millimeter-wave avalanche noise sources based on p-i-n diodes in 130 nm SiGe BiCMOS technology: Device characterization and CAD modeling. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 178976–178990. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027384>
15. Kebe M., Sanduleanu M. A low-phase-noise 8 GHz linear-band sub-millimeter-wave phase-locked loop in 22 nm FD-SOI CMOS. *Micromachines*, 2023, vol. 14, iss. 5, art. no. 1010. <https://doi.org/10.3390/mi14051010>

The article was submitted 15.06.2023; approved after reviewing 17.07.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Tatyana Yu. Krupkina – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K. A. Valiev, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), krupkina@dtd.miee.ru

Vladimir V. Losev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K. A. Valiev, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dtd@miee.ru

Sergey B. Benevolenskiy – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Russia, 127055, Moscow, Obraztsov st., 12, bld. 2), sbb640@gmail.com

Alexander I. Khlybov – Cand. Sci. (Eng), Researcher of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K. A. Valiev, 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 named after Academician K. A. Valiev, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), denis.rodionov@gmail.com

Методика оценки S -параметров высокоскоростных путей передачи сигналов в корпусах микросхем

А. В. Раков, И. В. Шевцов, О. В. Борин, Н. М. Горшкова, Д. В. Скок

АО НПЦ «ЭЛВИС», г. Москва, Россия

ngorshkova@elvees.com

Аннотация. В системах связи 5G для обеспечения максимальной скорости передачи данных требуется высокое качество характеристик всех элементов в составе сигнального пути. Для решения данной задачи необходимо провести анализ характеристик звеньев сигнального тракта. В работе выполнена оценка S -параметров высокоскоростных путей передачи сигналов, реализуемых в разрабатываемых корпусах новейших перспективных микросхем. На основе теории четырехполюсников предложен способ расчета комплексного коэффициента передачи с использованием результатов однопортовых измерений комплексных коэффициентов отражения. Рассмотрен один из вариантов реализации данного способа – концепция измерительной методики и состав требуемой измерительной ячейки. Проведено моделирование характеристик разработанных измерительных ячеек и высокоскоростных путей передачи сигналов, сформированных в корпусах микросхем. На основе результатов моделирования рассчитан комплексный коэффициент передачи и построен график погрешности оцениваемой характеристики. Предложенная методика оценки S -параметров позволяет улучшить характеристики сигнальных высокоскоростных путей в корпусах микросхем.

Ключевые слова: S -параметры, flip-chip-корпусирование микросхем, системы 5G, высокоскоростные цифровые устройства, интегральные микросхемы

Для цитирования: Методика оценки S -параметров высокоскоростных путей передачи сигналов в корпусах микросхем / А. В. Раков, И. В. Шевцов, О. В. Борин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 802–813. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-802-813>. – EDN: SMZGLX.

Original article

Methodology for estimating S-parameters of high-speed signal transmission paths in chip packages

A. V. Rakov, I. V. Shevtsov, O. V. Borin, N. M. Gorshkova, D. V. Skok

JSC SPC "ELVEES", Moscow, Russia

ngorshkova@elvees.com

Abstract. In the 5G communication systems, in order to ensure high data transfer rate the high quality of the characteristics of all elements in the signal path is required. It is necessary to analyze the characteristics of the signal path links to solve this problem. In this work, S-parameters of high-speed signal transmission paths implemented in chip packages being developed for latest promising microcircuits are analyzed. Based on quadrupole theory, a procedure for calculation of complex transfer coefficient using the results of single-port measurements of complex reflection coefficients is proposed. One of the options of this procedure implementation, the concept of the measuring technique and the composition of the required measuring cell, is considered. A simulation of characteristics of the developed measuring cells and high-speed signal transmission paths formed in the chip packages is conducted. Based on simulation results, the complex transfer coefficient has been calculated and the graph of the estimated characteristic error has been plotted. The proposed methodology of S-parameters estimation allows for improvement of characteristics of high-speed transmission paths in chip packages.

Keywords: S-parameters, flip chip packaging, 5G systems, high-speed digital devices, integrated circuits

For citation: Rakov A. V., Shevtsov I. V., Borin O. V., Gorshkova N. M., Skok D. V. Methodology for estimating S-parameters of high-speed signal transmission paths in chip packages. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 802–813. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-802-813>. – EDN: SMZGLX.

Введение. При разработке высокоскоростных цифровых устройств на кристалле, применяемых в телекоммуникационной системах, в том числе в системах связи 5G [1], для достижения оптимальных параметров немаловажную роль играют характеристики пути распространения сигнала. Проанализировав характеристики высокоскоростного сигнального пути в корпусе микросхемы, на основе полученных данных можно решить задачу синтеза совершенных путей распространения сигнала. Это, в свою очередь, позволит разработать телекоммуникационные устройства с повышенной скоростью передачи.

В настоящей работе проводится оценка характеристик части сигнального тракта – корпуса микросхемы.

Методы корпусирования микросхем. Корпусирование кристалла – это финальный этап производства микросхемы. В рамках данного этапа решаются задачи установки кристалла на корпусную опору для обеспечения его механической защиты, электрического соединения выводов кристалла и выводов корпуса, рассеивания необходимого количества тепла, требуемого для охлаждения кристалла и защиты кристалла от внеш-

них климатических воздействий. На сегодняшний день самыми популярными методами корпусирования микросхем являются flip-chip [2] и wire-bonding [3].

В настоящей работе рассматриваются высокоскоростные сигнальные пути, выполненные в корпусах flip-chip. Это обусловлено следующими причинами. При разработке сложных микросхем для телекоммуникационных устройств, например сигнальных процессоров, требуется большое количество выводов (бампов), которое может достигать нескольких тысяч (метод wire-bonding для таких микросхем не применим). Корпус flip-chip выполнен по технологии, напоминающей технологию печатных плат, что позволяет достичь хорошей повторяемости межсоединений, так как монтаж заключается в паяльном соединении бампов и контактных площадок корпуса. Корпус микросхемы для flip-chip-монтажа обеспечивает возможность гибкого применения различных smd электронных компонентов, требуемых для лучшего распределения питания по кристаллу. Монтаж корпуса flip-chip на печатную плату осуществляется с помощью матрицы сферических контактов BGA (Ball Grid Array) – шариков, вынесенных на всю нижнюю поверхность корпуса. Структура корпуса flip-chip, имеющая формулу 4-2-4, изображена на рис. 1.

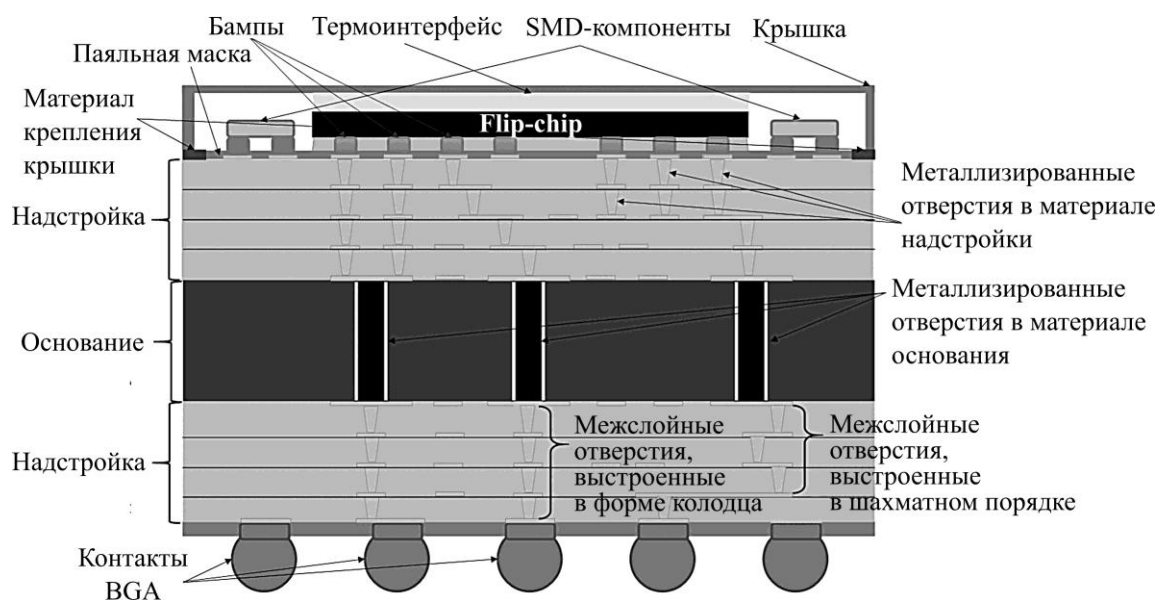


Рис. 1. Структура корпуса flip-chip
Fig. 1. Flip chip case structure

Однопортовая методика оценки неизвестных S-параметров многополюсника.

Проведем оценку комплексных коэффициентов отражения и передачи, составляющих матрицу S-параметров, высокоскоростных межсоединений между бампами кристалла и BGA-контактами корпуса.

Для измерения S-параметров применяются векторные анализаторы цепей (ВАЦ). Для измерения комплексного коэффициента передачи порты измерительного прибора должны быть подключены к тем контактам исследуемого устройства, между которыми осуществляется передача сигнала. Сложность измерения коэффициентов передачи между бампами кристалла и BGA-контактами корпуса обусловлена тем, что невозможно подключить порт измерительного прибора к бампам, так как кристалл смонтирован на контактные площадки корпуса flip-chip. Разработанный метод измерения полной матрицы S-параметров, включая комплексные коэффициенты передачи, с использованием

однопортовых измерений описан в работе [4], где вводятся понятия подключаемого порта – порта исследуемого устройства, доступного для подключения к ВАЦ, и неподключаемого порта исследуемого устройства – недоступного порта для подключения к ВАЦ. Данным понятиям соответствуют S-параметры: $S_{п.п}$ – коэффициент отражения от подключаемого порта; $S_{п.н}$ – коэффициент передачи от неподключаемого порта к подключаемому порту; $S_{н.п}$ – коэффициент передачи от подключаемого порта к неподключаемому порту; $S_{н.н}$ – коэффициент отражения от неподключаемого порта. Сформулируем решение задачи поиска неизвестных S-параметров на примере простейшего четырехполюсника, которым может являться взаимный однополосный сигнальный тракт.

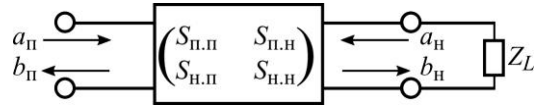


Рис. 2. Схема четырехполюсника
Fig. 2. The scheme of the quadrupole

На рис. 2 представлена схема исследуемого четырехполюсника. Уравнение для матрицы его S-параметров будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} b_p \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{п.п} & S_{п.н} \\ S_{н.п} & S_{н.н} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p \\ a_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где b_p – отраженная волна, принятая на срезе подключаемого порта; b_n – волна, отраженная от неподключаемого порта и падающая на нагрузку Z_L ; a_p – волна, падающая на подключенный порт; a_n – волна, падающая на неподключенный порт и отраженная от нагрузки Z_L .

Запишем уравнение отраженной волны от нагрузки:

$$a_n = S_L b_n, \quad (2)$$

где S_L – коэффициент отражения от нагрузки Z_L .

Отраженная волна от подключенного порта при измерении с помощью ВАЦ равна:

$$b_p = S_{11in} a_p, \quad (3)$$

где S_{11in} – коэффициент отражения от входа всей системы с подключенной нагрузкой.

Путем простейших алгебраических преобразований получаем

$$S_{п.п} + S_L (S_{п.н} S_{н.п} - S_{п.п} S_{н.н}) + S_L S_{н.н} S_{11in} = S_{11in}. \quad (4)$$

В матричной форме уравнение (4) имеет вид

$$\begin{bmatrix} 1 & S_L & S_L & S_{11in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{п.п} & & & \\ S_{п.н} S_{н.п} & - & S_{п.п} S_{н.н} & \\ & & & \\ & & S_{н.н} & \end{bmatrix} = S_{11in}. \quad (5)$$

Значение S_{11in} может быть получено прямым измерением на ВАЦ, значение S_L – путем моделирования, а также прямым измерением на ВАЦ, но с использованием специальной калибровочной процедуры. Выражение (5) представляет собой тождество, верное для разных значений Z_L . Составив систему из нескольких уравнений вида (5) для разных номиналов нагрузки, можно решить ее методом наименьших квадратов [5] относительно параметров $S_{п.п}$, $S_{п.н}$, $S_{н.п}$, $S_{н.н}$:

$$\begin{bmatrix} 1 & S_L^1 & S_L^1 S_{11in}^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & S_L^m & S_L^m S_{11in}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{п.п} & & & \\ S_{п.н} S_{н.п} & - & S_{п.п} S_{н.н} & \\ & & & \\ & & S_{н.н} & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11in}^1 \\ \dots \\ S_{11in}^m \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где m – индекс, обозначающий номер измерения.

Для решения системы уравнений (6) количество измерений m с разными номиналами нагрузки должно быть более двух. При этом чем больше m , тем точнее решение. Для повышения вероятности нахождения решения следует выбирать нагрузки с разными коэффициентами отражения по входу нагрузки S_L .

Большинство современных радиоэлектронных систем в качестве сигнальных трактов используют дифференциальные линии передачи ввиду их лучшей помехозащищенности [6]. В корпусе flip-chip высокоскоростные сигнальные пути также являются дифференциальными. В связи с тем что дифференциальная линия передачи образована двумя отдельными полосками, радиоэлектронное устройство с двумя дифференциальными портами будет описываться матрицей S -параметров размерностью 4×4 . Однако для упрощения решения задачи можно перейти к смешанной матрице (mixed-mode) S -параметров [7] и использовать только блок размерностью 2×2 S -параметров, относящихся к дифференциальной моде (S_{DD11} , S_{DD12} , S_{DD21} , S_{DD22}), с помощью которой передается полезная информация:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} S_{DD11} & S_{DD12} & S_{DC11} & S_{DC12} \\ S_{DD21} & S_{DD22} & S_{DC21} & S_{DC22} \\ S_{CD11} & S_{CD12} & S_{CC11} & S_{CC12} \\ S_{CD21} & S_{CD22} & S_{CC21} & S_{CC22} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Таким образом, для получения коэффициентов передачи между BGA-контактами корпуса достаточно провести серию как минимум из трех однопортовых измерений комплексных коэффициентов отражения со стороны подключаемых портов с разными нагрузками, подключенными со стороны неподключаемых портов.

Состав измерительной ячейки. Для подключения разных нагрузок со стороны неподключаемых портов использован измерительный кристалл, представляющий собой отдельное микроэлектронное устройство, имеющее идентичные рабочему чипу соединительные размеры (шаг и диаметр бампов), монтируемое на корпус вместо кристалла рабочей микросхемы. В соответствии с методикой однопортовых измерений основной функционал измерительного кристалла – это изменение номиналов нагрузок высокоскоростных сигнальных трактов со стороны неподключаемых портов (бампов) по желанию исследователя.

В качестве нагрузки использован n -канальный СВЧ КМОП-транзистор, выполненный по 90-нм технологии (рис. 3, а). Сток транзистора подключен к полоску высокоскоростной линии, исток – к опорной земле (рис. 3, б). На затвор транзистора подавали управляющее напряжение, позволяющее менять его рабочую точку и, соответственно, перестраивать величину сопротивления сток-исток.

Логично было бы подключить транзисторную нагрузку непосредственно к бампам, используя микрополоски меньшей длины (рис. 3, в). Однако в этом случае не будет возможности корректного измерения коэффициента отражения от нагрузки S_L , так как невозможно применить калибровку, позволяющую отбросить не интересующую исследователя часть сигнального пути. Соответственно, использование результатов моделирования для получения коэффициента отражения от нагрузки S_L связано с риском существенного увеличения ошибки метода.

Для успешного применения калибровочной процедуры длины линий, подключенных к калибровочным мерам, должны соответствовать длинам линий, используемым для подключения нагрузки. В рассматриваемом случае существует ограничение: длины калибровочных линий должны быть кратны шагу бампов. Приемлемым вариантом ка-

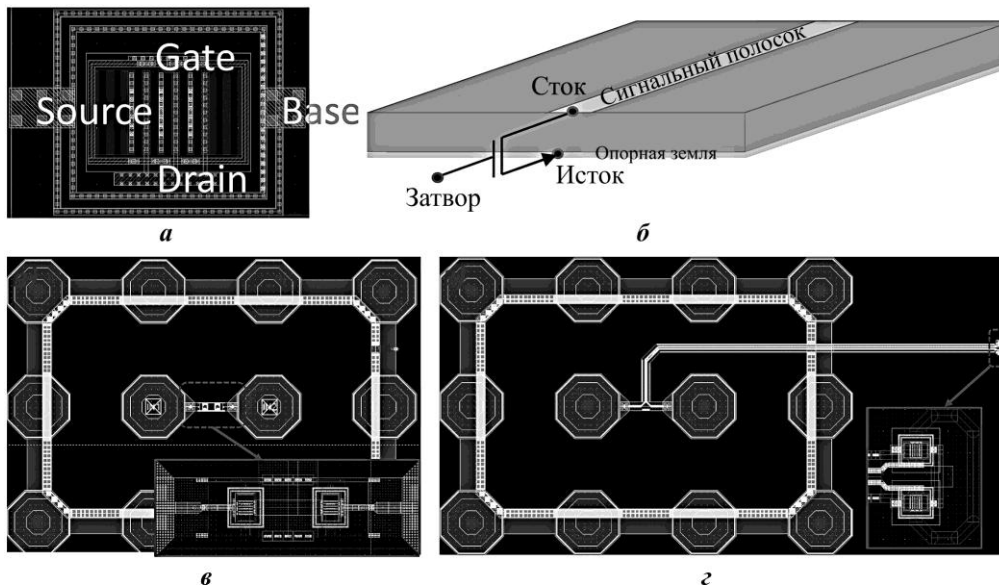


Рис. 3. Реализация перестраиваемой нагрузки на кристалле: *a* – топология транзисторной нагрузки; *б* – схема подключения транзисторной нагрузки к микрополоску; *в* – подключение нагрузки к бампам короткими линиями; *г* – подключение нагрузки к бампам калибруемыми линиями
 Fig. 3. Implementation of a tunable load on a chip: *a* – topology of the transistor load; *b* – wiring diagram of the transistor load to the microstrip; *c* – connection of the load to the bumps with short lines; *d* – connection of the load to the bumps with calibrated lines

либровки в таких условиях становится применение TRL калибровочного набора [8], реализованного непосредственно на измерительном кристалле. Таким образом, нагрузка подключается к бампу через полосок, длиной в два раза меньше, чем самая короткая линия TRL калибровочного набора THRU (рис. 3, *г*). Такой выбор обусловлен тем, что при калибровке происходит сдвиг фазовой плоскости ВАЦ на середину линии THRU, что соответствует непосредственно контактам транзисторной нагрузки при подключении через питающую линию. Таким образом, осуществляется так называемая операция de-embedding [9] – исключение влияния всей оставшейся части сигнального пути на измерения. В результате выполнения операции de-embedding есть возможность корректного прямого измерения S_L .

Измерительный прибор подключен к BGA-контактам корпуса специальной исследовательской печатной платой с ответной частью для BGA-контактов, на которую монтируется корпус микросхемы (рис. 4). На исследовательскую плату монтируются высокочастотные прижимные разъемы, подключаемые к кабелям измерительного прибора. Таким образом, весь сигнальный путь состоит из следующих звеньев: порт ВАЦ, коаксиальный кабель, коаксиально-полосковый переход, дифференциальная полосковая линия передачи на исследовательской печатной плате, переход с полосковой линии печатной платы на полосковую линию внутри корпуса микросхемы, полосок корпуса микросхемы, переход с полосок корпуса на полосок кристалла через бампы, транзисторная нагрузка.

Для получения коэффициента отражения со стороны BGA-контактов S_{11in} при измерении использован TRL калибровочный набор, расположенный на печатной плате и состоящий из четырех линий задержки LINEx, линии переемычки THRU, холостого хода OPEN и короткого замыкания SHORT в качестве эталонов отражения. Рабочий диапазон частот калибровочного набора 200 МГц – 32 ГГц (рис. 5, *а*). В процессе измерения калибровка позволяет не учитывать влияния части сигнального пути от порта ВАЦ вплоть до перехода с сигнальных полосков дифференциальной линии печатной платы через BGA-контакты на микрополоски внутри корпуса микросхемы.

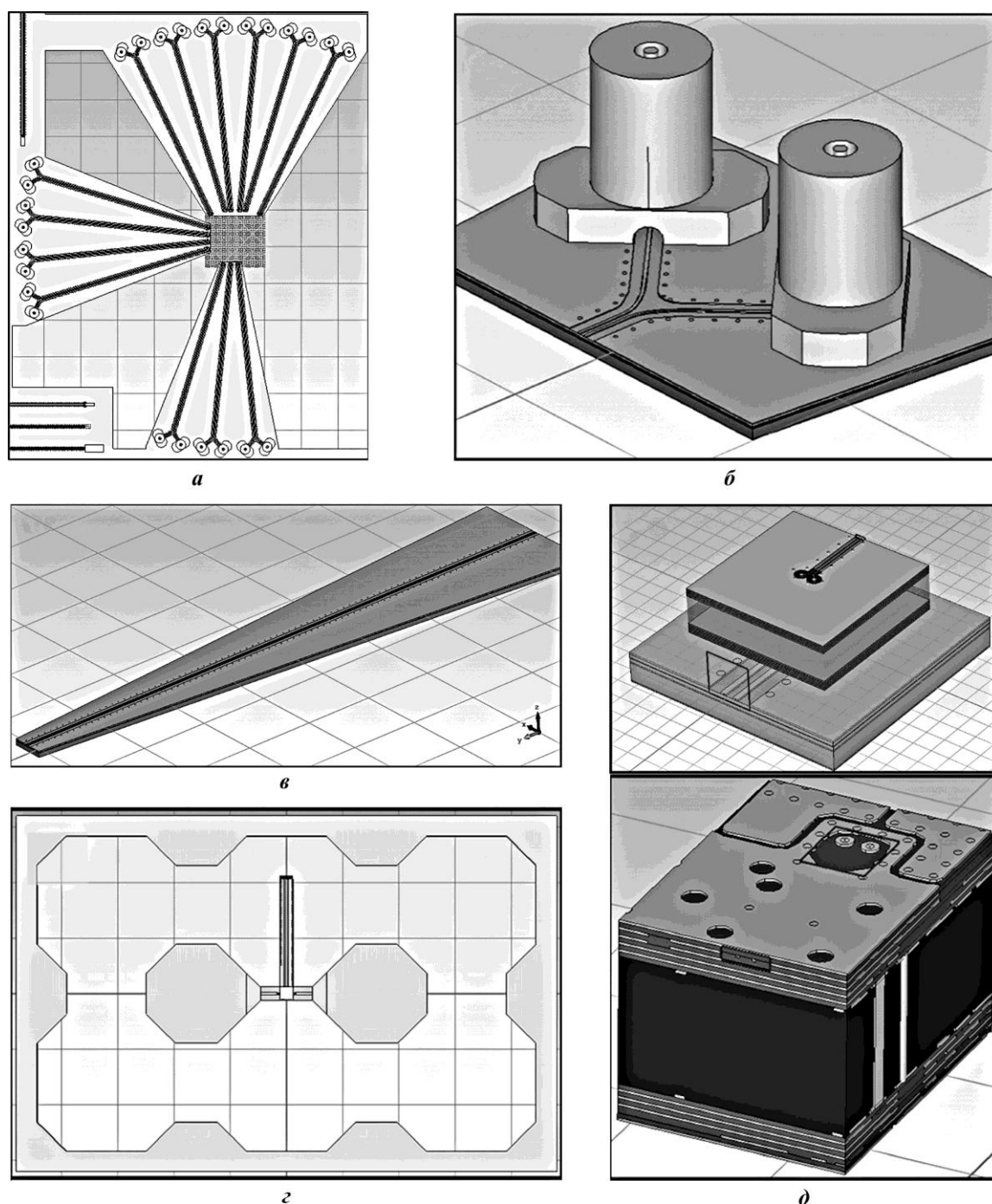


Рис. 4. Элементы сигнала пути: а – ответная часть BGA-контактов на печатной плате и высокоскоростные линии передачи; б – коаксиально-полосковые переходы дифференциальной линии; в – дифференциальная полосковая линия передачи на исследовательской печатной плате; г – переход с полоска корпуса на полосок кристалла через бампы; д – переход с полосковой линии печатной платы на полосковую линию внутри корпуса микросхемы

Fig. 4. Elements of the signal path: а – the mate of the BGA contacts on the printed circuit board and high-speed transmission lines; б – coaxial strip transitions of the differential line; в – differential strip transmission line on the research printed circuit board; г – transition from body strip on crystal strips through bumps; д – transition from the strip line of the printed circuit board to the strip line inside the chip housing

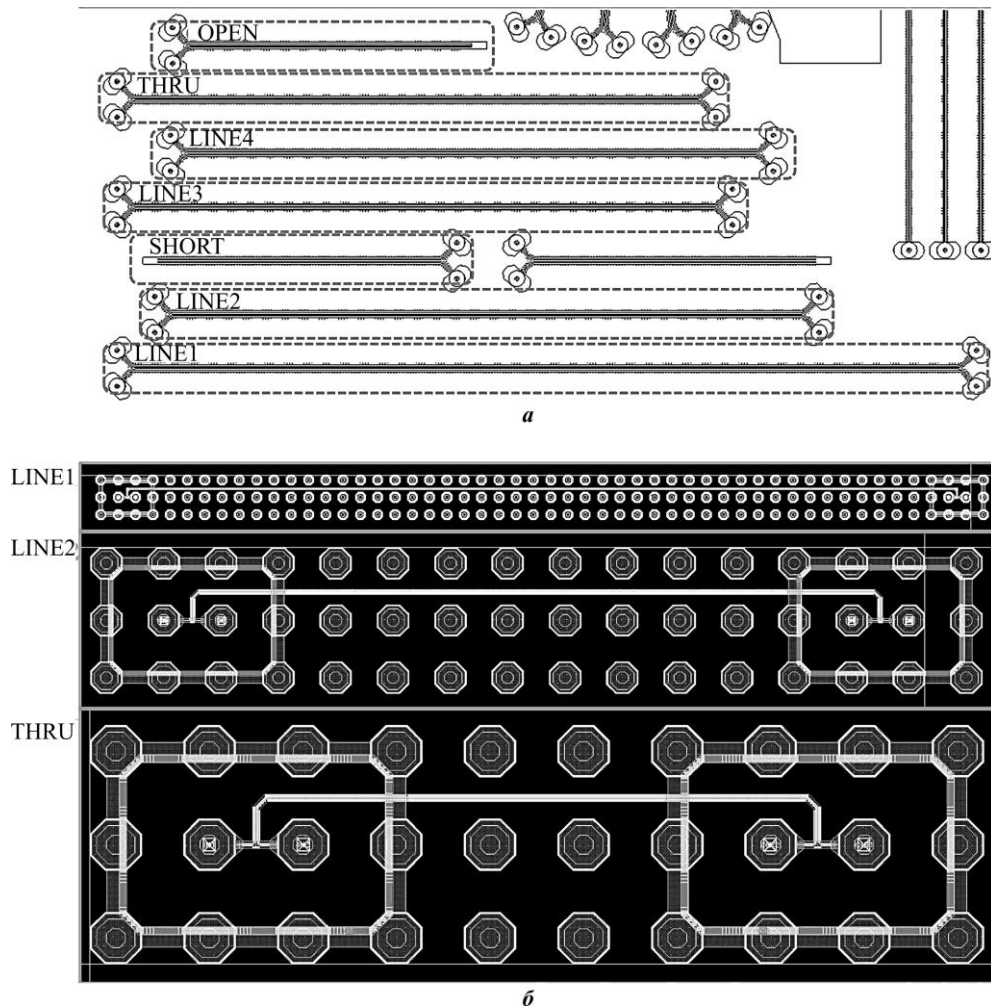


Рис. 5. Топологии применяемых TRL калибровочных наборов: а – на печатной плате; б – на кристалле
 Fig. 5. Topology of the used TRL calibration sets: a – on a printed circuit board; b – on a chip

Для получения коэффициентов отражения S_L от нагрузок, подключенных к банкам, на кристалле также реализован TRL калибровочный набор (рис. 5, б). Калибровочный набор состоит из двух линий задержки LINE1 и LINE2, линии перемычки THRU, холостого хода OPEN и короткого замыкания SHORT в качестве эталонов отражения. Рабочий диапазон частот калибровочного набора 1,75–32 ГГц. Так как калибровочные линии реализуются на кристалле, сложно выбрать длину линий эталонов, как на печатной плате. Длины линий эталонов всегда будут кратны шагу банпов.

Для успешной калибровки необходимо, чтобы характеристики сигнальных путей, ведущие к линиям-эталонам, имели максимально схожие характеристики в рабочем

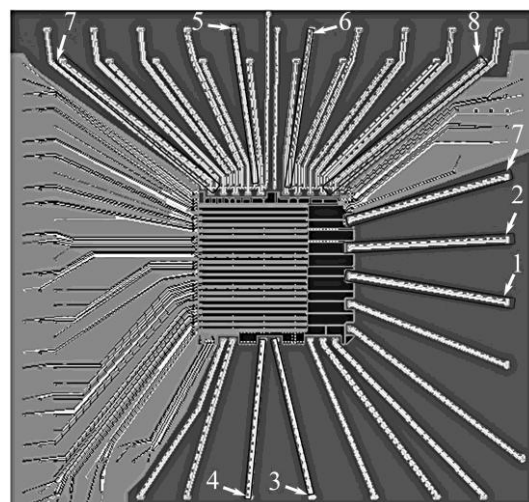


Рис. 6. Высокоскоростные сигнальные линии (1–8) корпуса микросхемы
 Fig. 6. High-speed signal lines (1–8) of the chip housing

диапазоне частот. Однако изначально характеристики сигнальных путей в корпусе неизвестны. Их выбор для подключения к калибровочным мерам на кристалле проводится на основе результатов моделирования. Выбраны линии в корпусе, имеющие максимально схожие коэффициенты передачи (рис. 6).

Из общего семейства повторяющихся кривых выбиваются только коэффициенты передачи сигнальных линий LINE-P1 и LINE-P2 (рис. 7). Данные сигнальные линии передачи обеспечивают подключение меры LINE1 – линии задержки TRL калибровочного набора на кристалле. Калибровочная линия задержки LINE1 работает в поддиапазоне частот 1,75–9 ГГц, и влияние погрешности на калибровку на низких частотах, где разница в коэффициентах передачи еще не так сильно выражена, незначительно.

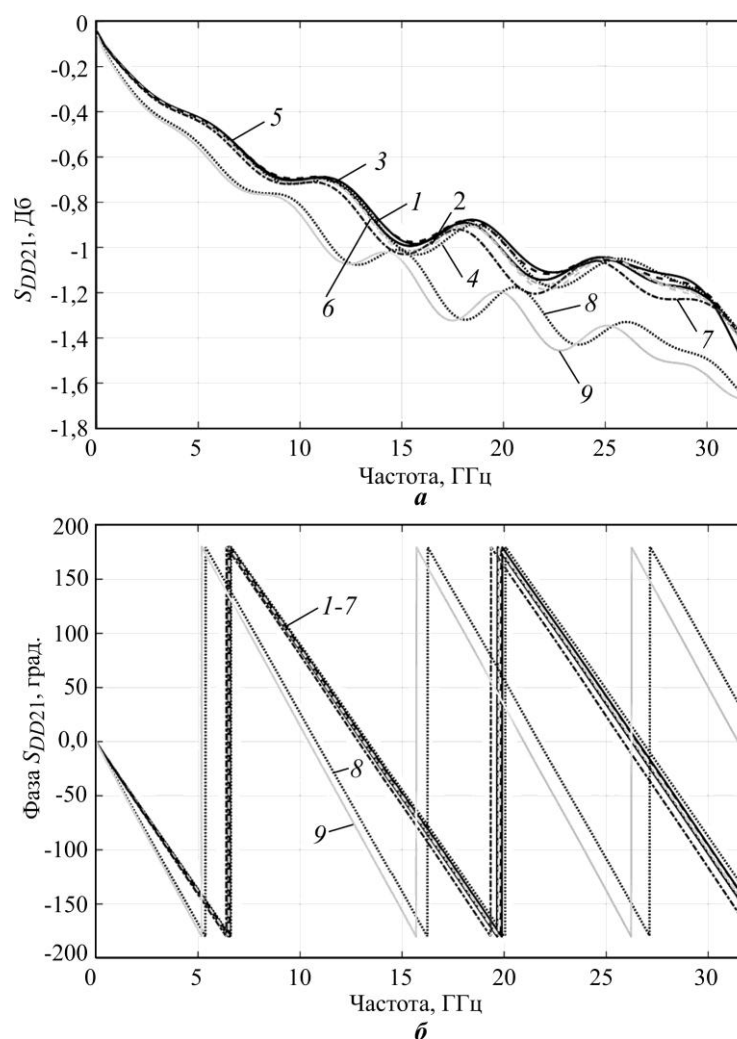


Рис. 7. Коэффициенты передачи сигнальных линий корпуса (а) и фазы коэффициентов передачи сигнальных линий корпуса (б): 1 – SHORT; 2 – OPEN; 3 – THRU-P1; 4 – THRU-P2; 5 – LINE-P1; 6 – LINE-P2; 7 – MATCH LOAD; 8 – LINE-P1; 9 – LINE-P2

Fig. 7. Transmission coefficients of the signal lines of the housing (a) and phases of transmission coefficients of the signal lines of the housing (b): 1 – SHORT; 2 – OPEN; 3 – THRU-P1; 4 – THRU-P2; 5 – LINE-P1; 6 – LINE-P2; 7 – MATCH LOAD; 8 – LINE-P1; 9 – LINE-P2

Результаты моделирования. Для повышения точности решения задачи поиска неизвестных S -параметров необходимо, чтобы коэффициенты S_L и S_{11in} для разных используемых в процессе измерений номиналов перестраиваемой транзисторной нагрузки значительно различались. Это условие налагает ряд требований на характеристики используемого в измерении сигнального тракта, содержащего звенья от местоположения фазовой плоскости до места непосредственного подключения нагрузки. Звенья сигнального тракта должны быть хорошо согласованы, чтобы основная часть отраженной волны была вызвана согласованием или рассогласованием нагрузки, т. е. отражение от звеньев сигнального пути должно быть намного меньше отражения от перестраиваемой нагрузки. Например, при измерении коэффициента S_L сигнальный путь состоит из перехода с полоска корпуса на полосок кристалла через бампы и регулярной дифференциальной сигнальной линии на кристалле. Характеристики данного сигнального пути приведены на рис. 8, *а*. При измерении коэффициента S_{11in} сигнальный путь состоит из коаксиально-полоскового перехода, дифференциальной полосковой линии передачи на исследовательской печатной плате, перехода с полосковой линии печатной платы на полосковую линию внутри корпуса микросхемы, регулярной дифференциальной линии внутри корпуса, перехода с микрополосковой линии внутри корпуса на микрополоски кристалла через бампы и регулярной дифференциальной сигнальной линии на кристалле. Характеристики данного сигнального пути представлены на рис. 8, *б*.

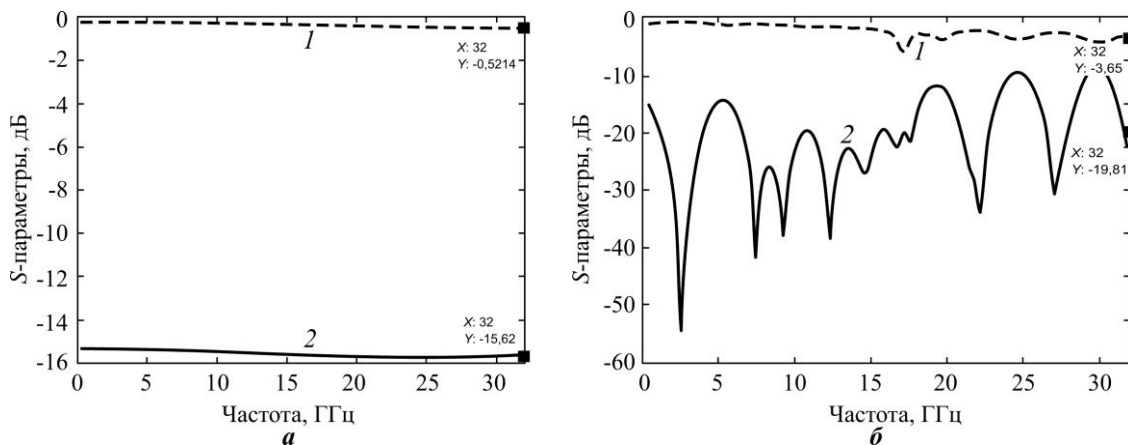


Рис. 8. Характеристики сигнальных путей при измерении S_L (*а*) и S_{11in} (*б*): кривая 1 – S_{DD21} ; кривая 2 – S_{DD11}

Fig. 8. Characteristics of signal paths when measuring S_L (*a*) and when measuring S_{11in} (*b*): curve 1 – S_{DD21} ; curve 2 – S_{DD11}

Таким образом, значение коэффициента S_{21} сигнального тракта ограничивает измеряемый коэффициент S_{11} от отражающей нагрузки: S_{11} (дБ) не может быть выше, чем удвоенный коэффициент передачи S_{21} . Коэффициент S_{11} сигнального тракта ограничивает коэффициент отражения от согласованной нагрузки: S_{11} (дБ) при подключенной согласованной нагрузке не может быть ниже, чем коэффициент отражения S_{11} самого сигнального тракта.

Используя смоделированные характеристики сигнальных путей при измерении S_{11in} и S_L и набор из трех нагрузок, можно промоделировать процедуру однопортовой оценки S_{21} . Результаты моделирования процедуры однопортовой оценки S_{21} представлены на рис. 9, *а*. Погрешность оценки коэффициента S_{21} (рис. 9, *б*) с использованием характеристик сигнальных путей, применяемых в измерениях, не превышает 9 % во всем диапазоне частот. Данную погрешность можно уменьшить, улучшив согласование звеньев сигнального пути.

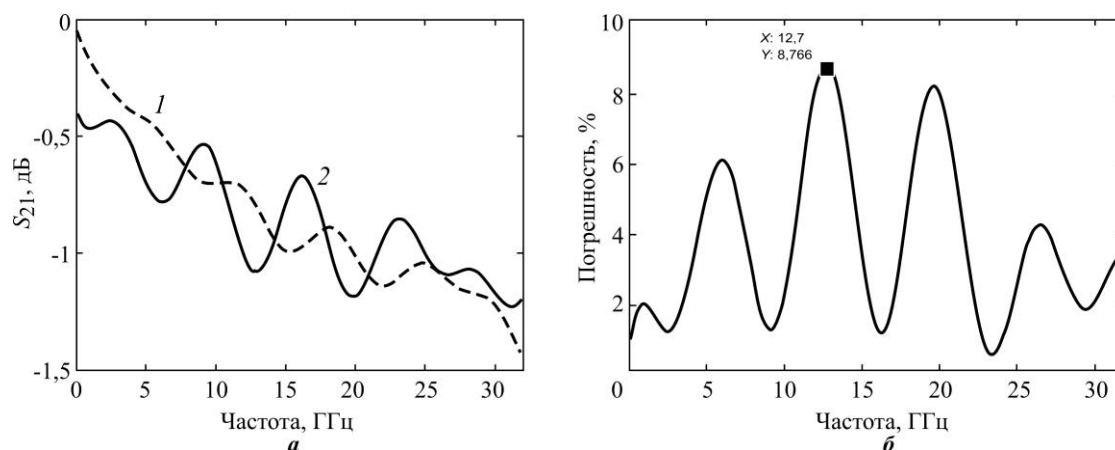


Рис. 9. Результаты моделирования процедуры однопортовой оценки S_{21} : а – сравнение заложенного в модель оригинального коэффициента S_{21} (кривая 1) и найденного (кривая 2); б – погрешность оценки S_{21}

Fig. 9. Simulation results of the single-port evaluation procedure S_{21} : а – comparison of the original coefficient S_{21} embedded in the model (curve 1) and found by the method (curve 2); б – the estimation error of the S_{21}

Заключение. Сформулированная концепция измерительной ячейки, а также основных ее узлов позволила реализовать методику оценки S -параметров высокоскоростных путей передачи сигналов в корпусе микросхемы. Предложенная методика дает возможность улучшить характеристики сигнальных высокоскоростных путей в корпусах микросхем.

Дальнейшая работа будет направлена на сверку моделируемых и экспериментальных характеристик изучаемых корпусов.

Литература

1. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey // IEEE Communication Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. Iss. 3. P. 1617–1655. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
2. Lanzone R. Market trends: Past, present, and future // Advanced Flip Chip Packaging / eds H.-M. Tong, Y.-S. Lai, C. Wong. Boston, MA: Springer US, 2013. P. 1–21. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5768-9_1
3. Harman G. Wire bonding in microelectronics. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010. 446 p.
4. An estimation method for the n port S parameters with $n - 1$ port measurements / N. Maeda, S. Fukui, K. Ichikawa et al. // 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Brugge: IEEE, 2013. P. 348–353. <https://doi.org/10.1109/ECCTD.2013.6662246>
5. Ipsen I. C. F. Numerical matrix analysis: Linear systems and least squares. Philadelphia: SIAM, 2009. 140 p.
6. Bockelman D. E., Eisenstadt W. R. Direct measurement of crosstalk between integrated differential circuits // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2000. Vol. 48. Iss. 8. P. 1410–1413. <https://doi.org/10.1109/22.859489>
7. Pozar D. M. Microwave engineering. 2nd ed. New York: Wiley, 1997. 736 p.
8. Multimode TRL and LRL calibrated measurements of differential devices / T. Buber, A. Rodriguez, A. Jenkins et al. // 64th ARFTG Microwave Measurements Conference. Orlando, FL: IEEE, 2004. P. 157–166. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2004.1427590>
9. Wartenberg S. A., Grajek P. De-embedding PCB fixtures for package characterization // Microw. Opt. Technol. Lett. 2001. Vol. 31. Iss. 2. P. 111–112. <https://doi.org/10.1002/mop.1372>

Статья поступила в редакцию 27.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 03.07.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Раков Алексей Владимирович – старший инженер АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), arakov@elvees.com

Шевцов Иван Валерьевич – ведущий инженер АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), ishevcov@elvees.com

Борин Олег Валерьевич – инженер АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), oborin@elvees.com

Горшкова Наталья Михайловна – кандидат технических наук, начальник лаборатории АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), ngorshkova@elvees.com

Скок Дмитрий Владимирович – директор по проектированию АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), dskok@elvees.com

References

1. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, iss. 3, pp. 1617–1655. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
2. Lanzone R. Market trends: Past, present, and future. *Advanced Flip Chip Packaging*, eds H.-M. Tong, Y.-S. Lai, C. Wong. Boston, MA, Springer US, 2013, pp. 1–21. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5768-9_1
3. Harman G. *Wire bonding in microelectronics*. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 2010. 446 p.
4. Maeda N., Fukui S., Ichikawa K., Sakurai Y., Sekine T., Takahashi Y. An estimation method for the n port S parameters with $n - 1$ port measurements. *2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Brugge, IEEE, 2013, pp. 348–353. <https://doi.org/10.1109/ECCTD.2013.6662246>
5. Ipsen I. C. F. *Numerical matrix analysis: Linear systems and least squares*. Philadelphia, SIAM, 2009. 140 p.
6. Bockelman D. E., Eisenstadt W. R. Direct measurement of crosstalk between integrated differential circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, vol. 48, iss. 8, pp. 1410–1413. <https://doi.org/10.1109/22.859489>
7. Pozar D. M. *Microwave engineering*. 2nd ed. New York, Wiley, 1997. 736 p.
8. Buber T., Rodriguez A., Jenkins A., Mahon J., Liss C., Lanteri J.-P., Kinayman N., Wohlert R. et al. Multimode TRL and LRL calibrated measurements of differential devices. *64th ARFTG Microwave Measurements Conference*. Orlando, FL, IEEE, 2004, pp. 157–166. <https://doi.org/10.1109/ARFTGF.2004.1427590>
9. Wartenberg S. A., Grajek P. De-embedding PCB fixtures for package characterization. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2001, vol. 31, iss. 2, pp. 111–112. <https://doi.org/10.1002/mop.1372>

The article was submitted 27.06.2023; approved after reviewing 03.07.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Alexey V. Rakov – Senior Engineer, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), arakov@elvees.com

Ivan V. Shevtsov – Leading Engineer, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), ishevcov@elvees.com

Oleg V. Borin – Engineer, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), oborin@elvees.com

Natalia M. Gorshkova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), ngorshkova@elvees.com

Dmitry V. Skok – Director of Design, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), dskok@elvees.com

Высокоскоростной перестраиваемый КМОП-усилитель-ограничитель для приемника сигнала оптической линии

*Н. Ю. Раннев, С. В. Кондратенко, А. В. Дубинский,
Н. М. Горшкова, Д. В. Скок*

АО НПП «ЭЛВИС», г. Москва, Россия

nrannev@elvees.com

Аннотация. Для полной реализации преимуществ оптических линий передачи необходимо использование специализированных преempoпередатчиков, в частности высокоскоростных приемников с большим внутренним коэффициентом усиления сигналов. Проектирование таких приемников усложняют влияние напряжения смещения в цепочке усилительных каскадов с непосредственными связями между ними, а также общесистемные ограничения на потребляемый ток (мощность) и площадь, занимаемую приемником на кристалле. В работе представлены варианты построения на структурном уровне усилителей-ограничителей в составе высокоскоростных приемников сигналов оптических линий. Отмечено, что в типовой структуре приемника сигнала усилитель-ограничитель может содержать 6–8 и более усилительных каскадов, не считая, как правило, активных каскадов в цепях низкочастотных локальных или глобальной обратной связи, и вместе с предшествующим ему трансимпедансным усилителем, имеющим для разных вариантов реализации передаточное сопротивление от 100 Ом до 100 кОм, обеспечивать чувствительность начиная с нескольких милливольт. Приведены схемотехнические решения основных функциональных узлов усилителя-ограничителя, спроектированного по стандартной КМОП-технологии исходя из жестких требований к току (мощности) потребления и достижимой скорости передачи, а также возможности цифровой регулировки в широких пределах коэффициента усиления и параметров, характеризующих глубину CTLE-коррекции. Спроектированный усилитель-ограничитель по результатам расчетов имеет максимальную скорость передачи 12,5 Гбит/с, чувствительность по входу не хуже 5 мВ и высокую энергетическую эффективность по сравнению с аналогичными устройствами.

Ключевые слова: усилитель-ограничитель, аналоговая емкостная высокочастотная коррекция, комплементарный металл-оксид-полупроводник, волоконно-оптическая система передачи, сверхбольшая интегральная схема

Для цитирования: Высокоскоростной перестраиваемый КМОП-усилитель-ограничитель для приемника сигнала оптической линии / Н. Ю. Раннев, С. В. Кондратенко, А. В. Дубинский и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 814–825. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-814-825>. – EDN: HKAZQU.

Original article

High-speed tunable CMOS limiter amplifier for optical line signal receiver

N. Yu. Rannev, S. V. Kondratenko, A. V. Dubinsky,
N. M. Gorshkova, D. V. Skok

JSC SPC "ELVEES", Moscow, Russia

nrannev@elvees.com

Abstract. Full realization of advantages of optical transmission lines requires the use of specialized transceivers and, in particular, high-speed receivers with a large internal signal gain. The design of such receivers is complicated by the solution of problem of bias voltage impact in a chain of amplifying stages with direct connections between them, and by the system-wide restrictions on the consumed current (power) and the area occupied by the receiver on a chip. In this work, the options for constructing limiter amplifiers as part of high-speed signal receivers from optical lines at the structural level are presented. It is noted that in the typical structure of the signal receiver, the limiter amplifier may contain 6–8 or more amplifying stages, not counting, as a rule, the active stages in the low-frequency local or global feedback circuits, and it can, together with the transimpedance amplifier preceding it and having for different implementation options a transfer resistance from 100 Ohm to 100 kOhm, provide sensitivity starting from a few millivolts. The circuit solutions of the main functional units of the limiter amplifier designed according to the standard CMOS technology based on the stringent requirements for the current (power) consumption and achievable transmission rate, as well as the possibility of digital adjustment over a wide range of gain and parameters characterizing the depth of CTLE correction, are presented. Calculation results have demonstrated that the designed limiter amplifier has a maximum transmission rate of 12.5 Gbit/s, an input sensitivity of at least 5 mV, and high energy efficiency in comparison with similar devices.

Keywords: limiter amplifier, analog capacitive high-frequency correction, complementary metal-oxide-semiconductor, optic fiber transmission system, very large scale integration circuit

For citation: Rannev N. Yu., Kondratenko S. V., Dubinsky A. V., Gorshkova N. M., Skok D. V. High-speed tunable CMOS limiter amplifier for optical line signal receiver. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 814–825. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-814-825>. – EDN: HKAZQU.

Введение. В приемниках сигналов оптических линий, как правило, требуется выполнять технически противоречивое требование – обеспечивать высокое усиление сигналов при высокой скорости передачи. На практике задача проектирования подобных приемников может дополнительно усложняться ввиду ограничений на потребляемый ток (мощность) и площадь, занимаемую приемником на кристалле. Такие ограничения налагает задача проектирования СБИС типа система на кристалле.

В настоящей работе рассматривается КМОП-усилитель-ограничитель, особенность которого – реализация перестройки его коэффициента усиления и параметров, характеризующих высокочастотную коррекцию, используемую не только для компенсации линейных искажений входных сигналов, но и для достижения высокой скорости передачи без излишнего увеличения тока и мощности потребления.

Типовые структуры высокоскоростных приемников сигналов оптических линий. Требование преобразования малых по амплитуде сигналов (чаще всего на уровне внутренних шумов) в выходные сигналы с достаточным для работы последующей цифровой части размахом или непосредственно в цифровые сигналы возникает не только в случае приема сигналов оптических линий. Повышенные требования к чувствительности (коэффициенту усиления) приемников предъявляются, например, в случаях их применения в качестве высокочувствительных датчиков электрических и неэлектрических величин; многоканальных трактов съема и преобразования малых сигналов в физических экспериментах; приемников сигналов в беспроводных сетях со значительным ослаблением этих сигналов из-за больших расстояний передачи и/или атмосферных явлений.

Для приемников сигналов оптических линий передачи после преобразования сигнала из оптической формы в электрическую в преобразователе / предусилителе ТИА (трансимпедансный усилитель) минимальная амплитуда напряжения находится, как правило, в милливольтном диапазоне и подлежит дальнейшему существенному усилению в усилителе-ограничителе LA (рис. 1). В трансимпедансном усилителе ТИА используются периферийные транзисторы и повышенное напряжение питания, в усилителе-ограничителе LA – транзисторы и напряжение питания ядра.

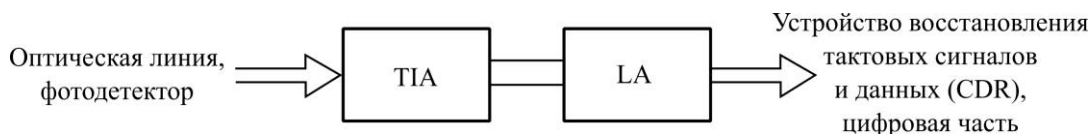


Рис. 1. Типовая структура приемника сигнала с оптической линии

Fig. 1. Typical structure of a signal receiver from an optical line

Общее внутреннее усиление может перераспределяться между блоками ТИА и LA по-разному. Результаты анализа литературы [1, 2] показывают, что усиление (передаточное сопротивление) большинства изготовленных трансимпедансных усилителей ТИА находится в диапазоне 40–100 дБом, т. е. от 100 Ом до 100 кОм. Как правило, это фиксированное усиление, значение которого выбирается при проектировании блока ТИА в зависимости от параметров сигнала, снимаемого с фотодиода, требуемой скорости передачи и приведенных ко входу шумов. Требуемый коэффициент усиления LA по напряжению может быть более 100, так как амплитуда сигнала должна быть увеличена с нескольких милливольт на его входе до 400 мВ на выходе типового CML-каскада, выполненного по субмикронной КМОП-технологии. Высокая чувствительность усилителя-формирователя снижает требуемое усиление блока ТИА. Это важно, поскольку при построении блока ТИА в отличие от LA вместо транзисторов ядра используются периферийные транзисторы с худшими высокочастотными свойствами.

Согласно работам [1, 3–7] требуемое усиление усилителя-ограничителя LA достигается последовательным включением 6–8 и более усилительных каскадов. При этом влияние накапливающегося от каскада к каскаду напряжения смещения существенно. По сравнению с другими усилителями с высоким коэффициентом усиления в случае усилителей-ограничителей в составе приемников сигналов с оптических линий разделительные или переключаемые конденсаторы для исключения передачи постоянной

составляющей сигналов обычно не используются, так как связи каскадов непосредственные. Более рациональные решения при использовании каналов отрицательной низкочастотной (НЧ) обратной связи (ОС), снижающей влияние напряжения смещения, позволяют достичь требуемого эффекта. Конфигурация НЧ ОС может быть разной: локальной на каждые два каскада с непересекающимися (steam-mode feedback) [6] или пересекающимися (перекрестными) цепями ОС (staggered feedback, interleaving feedback) [4, 7] либо глобальной, охватывающей сразу несколько каскадов [1, 3]. В основном используется активная НЧ ОС с дополнительным усилителем в канале ОС для эффективного снижения влияния напряжения смещения. На рис. 2 в упрощенном виде (без учета дифференциального характера передаваемых сигналов) показаны перечисленные варианты структур усилителей-ограничителей LA. В канале прямой передачи и в цепях ОС чаще всего используются усилительные СМЛ-каскады. На входах или выходах каскадов в цепях ОС включаются простейшие RC-фильтры низких частот. На входе и выходе усилителей-ограничителей в общем случае используются входной и выходной буферы вне цепей ОС.

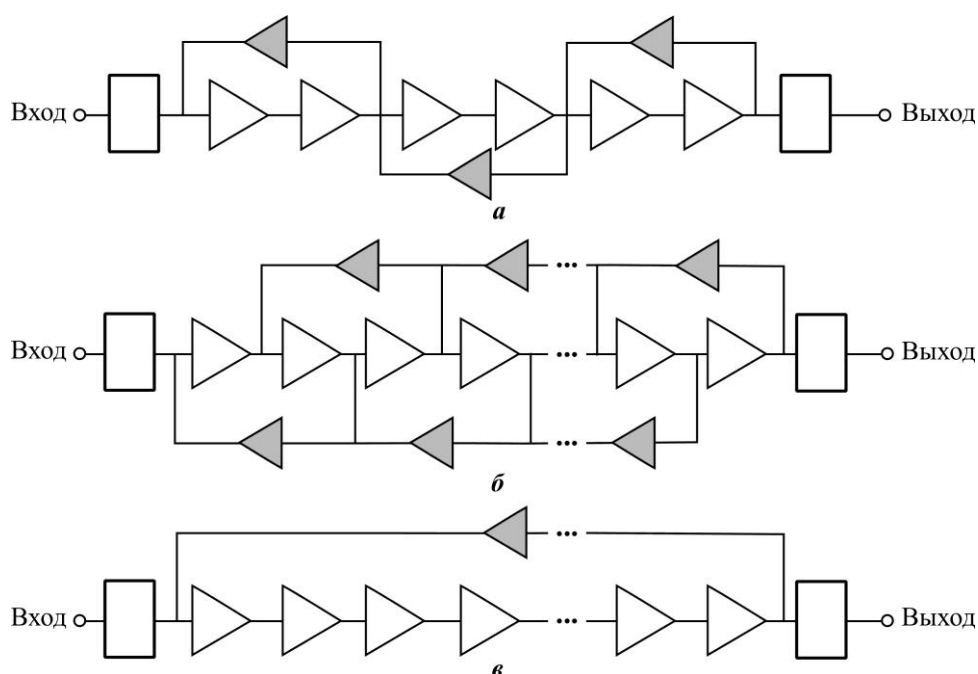


Рис. 2. Варианты структур усилителей-ограничителей LA: а – структура с локальными цепями НЧ ОС типа steam-mode feedback; б – структура с локальными цепями НЧ ОС типа staggered or interleaving feedback; в – структура с глобальной НЧ ОС

Fig. 2. Variants of structures of LA limiter amplifiers: a – structure with local low-frequency feedback circuits of the steam-mode feedback type; b – structure with local low-frequency feedback circuits of the staggered or interleaving feedback type; c – structure with global low-frequency feedback

Варианты структур со множеством локальных ОС позволяют повысить качество амплитудно-частотной характеристики усилительного тракта: увеличить ширину полосы пропускания и улучшить равномерность амплитудно-частотной характеристики в пределах этой полосы [4, 6]. С целью расширения полосы пропускания широко применяется высокочастотная индуктивная коррекция (*L-peaking*) в СМЛ-каскадах, в том числе если требуется максимально использовать возможности доступной технологии. Следует отметить, что подобные решения приводят к дополнительным затратам потребляемой мощности и дополнительной площади на кристалле.

Требуемые параметры и структура проектируемого КМОП-усилителя-ограничителя (LA). Требования, предъявляемые к проектируемому усилителю-ограничителю, следующие:

- скорость изменения принимаемых данных 1–12,5 Гбит/с;
- чувствительность усилителя-ограничителя не хуже 5 мВ с коэффициентом усиления сигналов с амплитудой не менее 40 дБ;
- формирование регулируемых предискажений принимаемых сигналов не менее 1 дБ;
- управление симметрией выходного дифференциального сигнала;
- пониженные потребляемые ток и мощность с учетом лучших достигнутых значений показателя энергетической эффективности для подобных устройств менее 1 пДж/бит [8].

Структурная схема проектируемого блока усилителя-формирователя приведена на рис. 3.

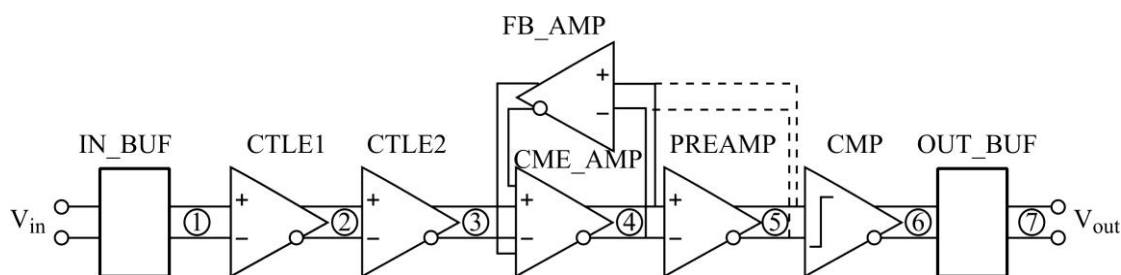


Рис. 3. Структурная схема проектируемого усилителя-формирователя (1–7 – номера каскадов, пунктиром выделен альтернативный вариант НЧ ОС)

Fig. 3. Block diagram of the designed amplifier-shaper (1–7 – cascade numbers, an alternative variant of low-frequency feedback is highlighted with a dotted line)

Входной буферный каскад IN_BUF транслирует входной сигнал без усиления, реализует стандартное входное сопротивление приемника, равное 100 Ом, защиту ESD и обеспечивает оптимальное смещение входов последующего CML-каскада в составе блока CTLE1. Высокая требуемая чувствительность в широком диапазоне скоростей передачи реализована за счет включения пяти последовательных усилительных каскадов с относительно низким собственным усилением и непосредственными связями между ними. В усилительных каскадах CTLE1, CTLE2 используется аналоговая емкостная высокочастотная коррекция (CTLE), которая выбрана в силу простоты реализации перестройки глубины коррекции и относительно малой занимаемой площади на кристалле по сравнению с индуктивной коррекцией. Для снижения влияния напряжения смещения в цепочке каскадов предусмотрено использование НЧ ОС, охватывающей часть каскадов со значительным усилением. После того как сигнал достаточно усилен, он подается на компаратор CMP и последующий CML-каскад (выходной буфер OUT_BUF), которые обеспечивают нормализацию амплитуды выходного дифференциального сигнала усилителя-ограничителя для работы последующей цифровой части.

Основные схемотехнические решения и цифровое управление параметрами.

Проектирование усилителя-ограничителя выполняли с использованием стандартной субмикронной КМОП-технологии. Напряжение питания транзисторов ядра равно 0,9 В, расчетная частота генерации кольцевого генератора, построенного на трех инверторах с минимальными размерами транзисторов, составляет 28, 41 и 57 ГГц соответственно в

наихудших, типовых и наилучших условиях. Последнее обеспечивает реализацию требуемого быстродействия проектируемого КМОП-усилителя-формирователя. Упрощенные схемы для каскадов 1 (CTLE1) и 2 (CTLE2) усиления с управляемой CTLE-коррекцией представлены на рис. 4, а, б. В приведенных схемах не показаны цепи обработки сигналов ON и FB_EN. Каскад 3 отличается наличием местной отрицательной ОС для стабилизации режима и дополнительными выводами для подключения входов и выходов НЧ ОС. Каскад 4 служит предусилителем для компаратора и содержит фиксированную CTLE-коррекцию. Он также содержит дополнительные выводы для альтернативного подключения входов НЧ ОС. В выходном каскаде (рис. 4, в) предусмотрена реализация управления симметрией выходного дифференциального сигнала. Для этого дешифратор DC, управляемый кодом $CLB\langle 4:0 \rangle$, транслирует напряжение смещения BIAS, задающее токи смещения на выходах каскада OUT_BUF и усилителя-ограничителя в целом. В каскадах на рис. 4 реализовано цифровое управление параметрами. Характеристики управляющих сигналов приведены в табл. 1. Все регулировки двоично-взвешенные, следовательно, например, значение каждой емкости в корректирующей цепи CTLE может быть установлено равным $C0 \cdot n$, где $C0 = 30$ фФ, $n = 0, 1, 2, 3$.

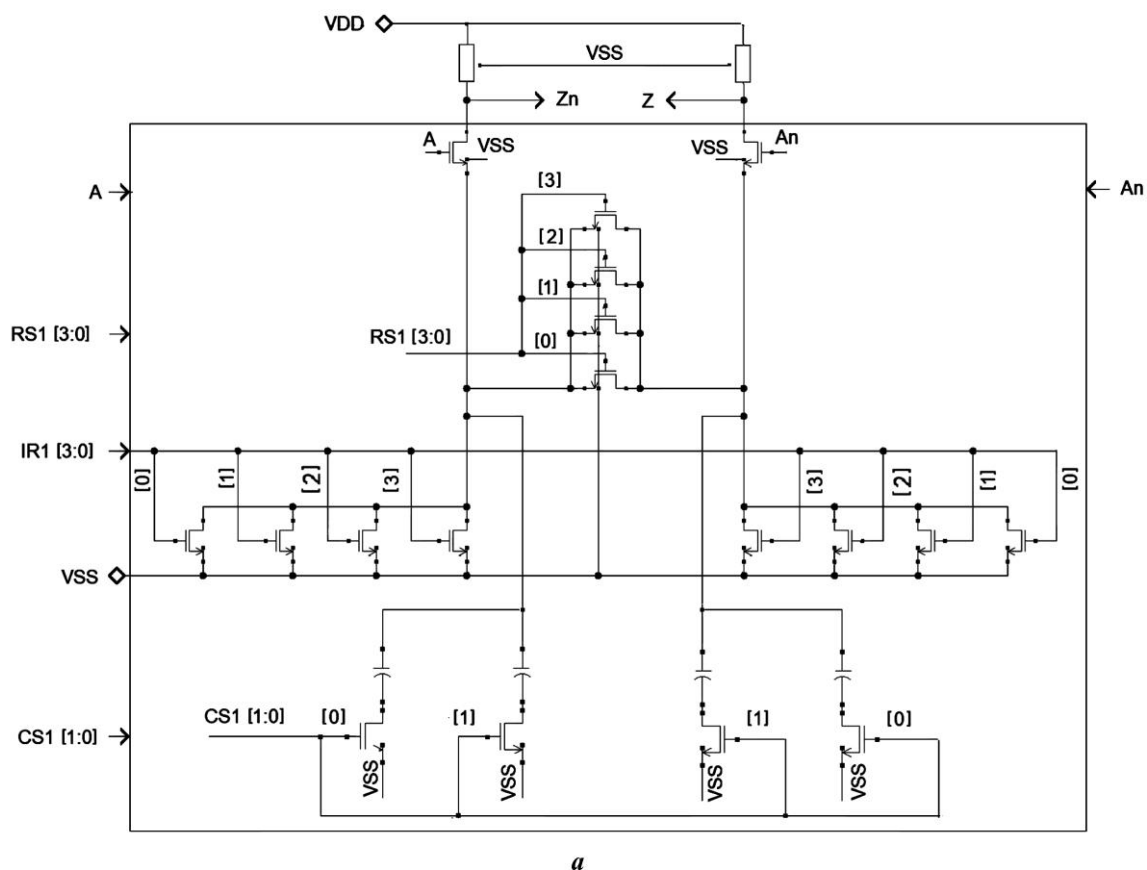


Рис. 4. Упрощенные схемы каскадов: а – каскад CTLE1
 Fig. 4. Simplified cascade diagrams: а – CTLE1 cascade

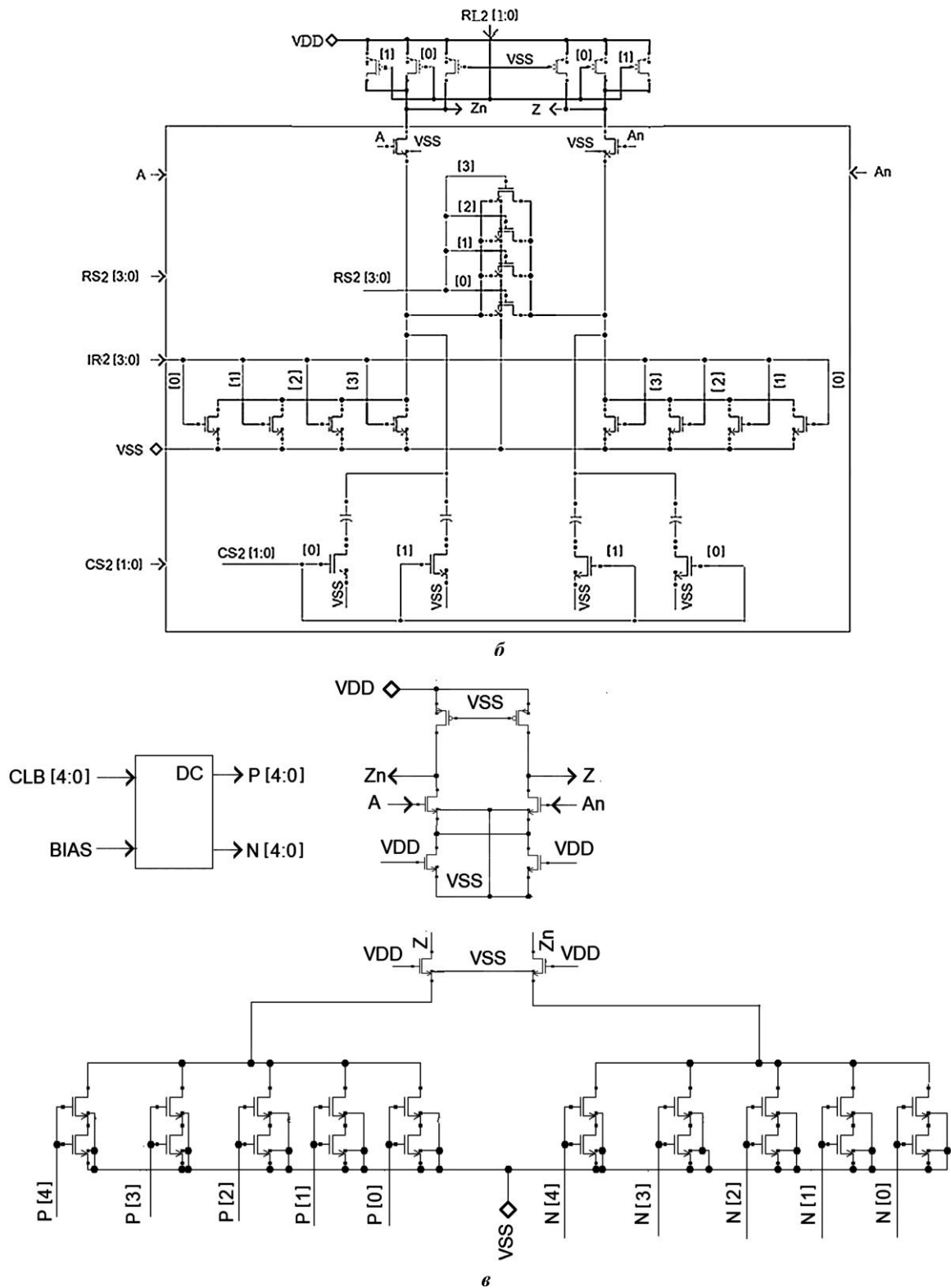


Рис. 4. Упрощенные схемы каскадов: б – каскад CTLE2; в – выходной каскад OUT_BUF
 Fig. 4. Simplified cascade diagrams: б – CTLE2 cascade; в – OUT_BUF output stage

Таблица 1

Характеристики управляющих сигналов

Table 1

Characteristics of control signals

Управляющий сигнал	Значение n при расчетах	Используемый каскад	Назначение сигнала
CS1<1:0>	3	CTLE1	Управление емкостью в корректирующей цепи CTLE
RS1<3:0>	1	CTLE1	Управление сопротивлением в корректирующей цепи CTLE
IR1<3:0>	1	CTLE1	Управление опорным током CML-каскада
CS2<1:0>	3	CTLE2	Управление емкостью в корректирующей цепи CTLE
RS2<3:0>	1	CTLE2	Управление сопротивлением в корректирующей цепи CTLE
IR2<3:0>	3	CTLE2	Управление опорным током CML-каскада
RL2<1:0>	1	CTLE2	Управление сопротивлениями нагрузочных резисторов CML-каскада
CLB<4:0>	0	OUT_BUF	Управление симметрией выходного дифференциального сигнала
ON	1	CTLE1, CTLE2, PREAMP, CMP, OUT_BUF, FB_AMP	Перевод в режим пониженного потребления (при ON = 0)
FB_EN	1	PREAMP, OUT_BUF, FB_AMP	Отключение цепи НЧ ОС (при FB_EN = 0)

Расчетные характеристики и параметры. Выполнен расчет основных параметров и характеристик спроектированного КМОП-усилителя-ограничителя на схемотехническом уровне. Принятые при расчетах фиксированные значения управляющих сигналов приведены в табл. 1. Поскольку усилитель-ограничитель – нелинейное устройство, то его усиление контролировалось при расчетах во временной области.

На рис. 5 приведены рассчитанные при типовых условиях зависимости амплитуд на выходах каскадов S1–S7 (см. рис. 3) от амплитуды входного сигнала КМОП-усилителя-ограничителя. Видно, что начиная с амплитуды входного сигнала 5 мВ амплитуда сигнала на выходе усилителя-ограничителя практически нормализуется. В рассматриваемом диапазоне изменения амплитуд входных сигналов средний уровень промежуточных сигналов на входах CML-каскадов не более 500–700 мВ и подтверждает отсутствие жестких нелинейных ограничений сигналов до их нормализации на выходе. Глазковые диаграммы (рис. 6, а), рассчитанные при максимально требуемой скорости передачи 12,5 Гбит/с, также слабо зависят от амплитуды входного сигнала начиная с 5 мВ и подтверждают достижение этой скорости. Расчеты показали, что использование альтернативного варианта НЧ ОС, выделенного на рис. 3 пунктиром, никаких преимуществ не дает.

При минимальной амплитуде входного сигнала, равной 5 мВ, исследовали влияние температуры и технологических разбросов параметров транзисторов (ss, tt, ff) на работу КМОП-усилителя-ограничителя. Изменения глазковых диаграмм (рис. 6, б) при этом не критичны. На рис. 7 приведены дифференциальные сигналы на выходах каскадов CTLE1 (S2) и CTLE2 (S3), подтверждающие эффективность CTLE-коррекции. Расчеты подтвердили достижение требуемых параметров усилителя-ограничителя.

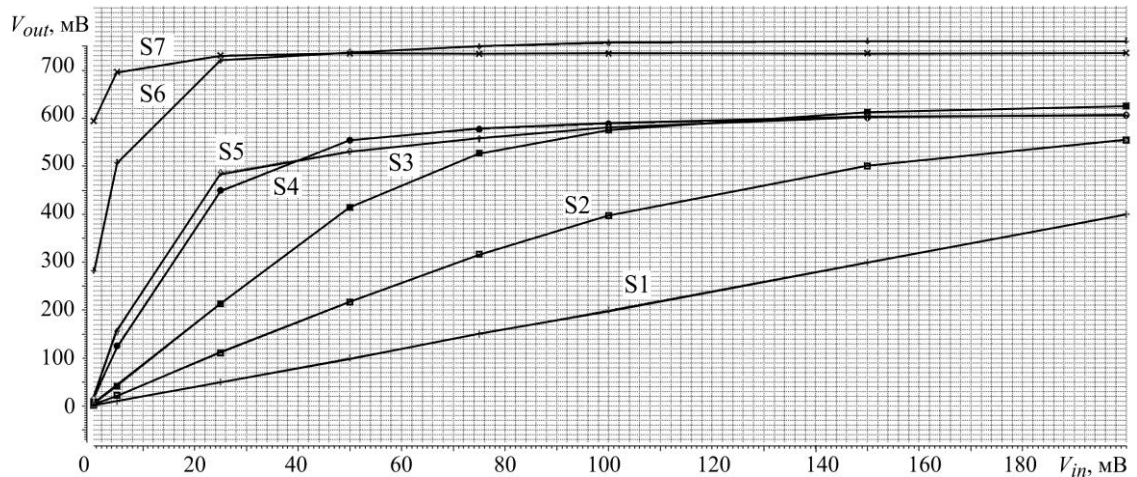


Рис. 5. Зависимость амплитуды дифференциальных выходных сигналов V_{out} каскадов S1–S7 от амплитуды входного сигнала V_{in} КМОП-усилителя-ограничителя

Fig. 5. Dependence of the amplitudes of differential signals at the outputs V_{out} of cascades S1–S7 on the amplitude of the input signal V_{in} of the CMOS limiter amplifier

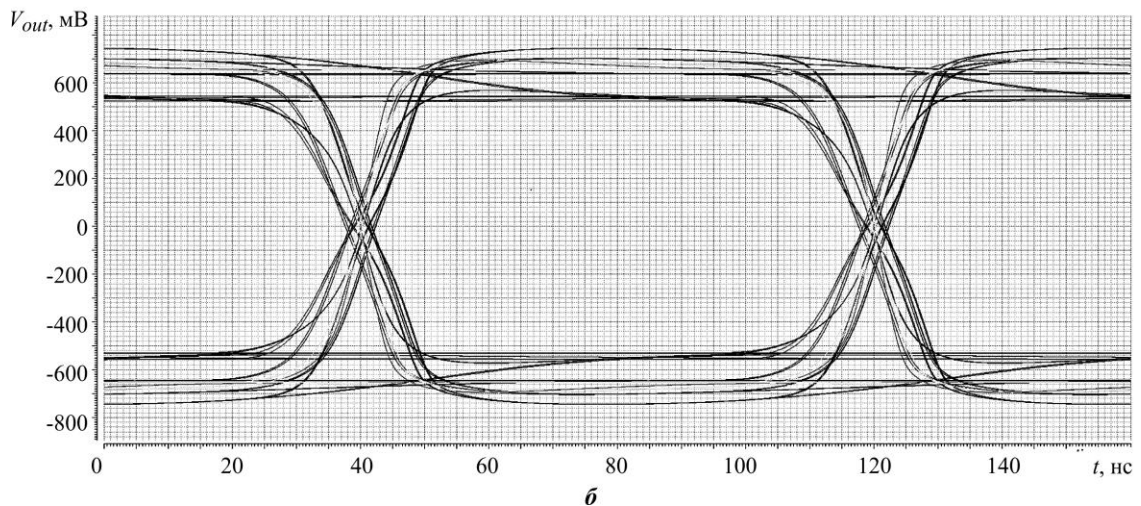
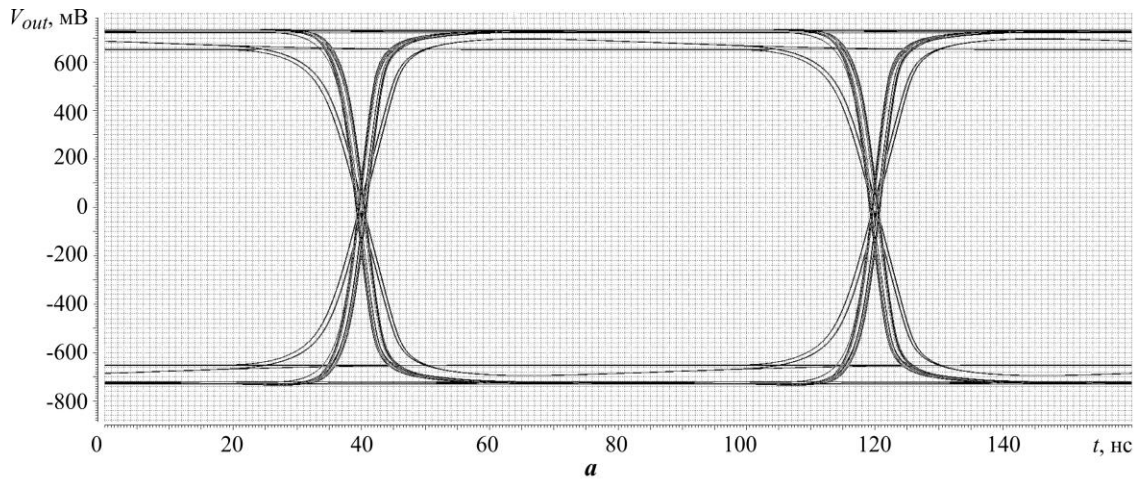


Рис. 6. Глазковые диаграммы для выходного сигнала V_{out} КМОП-усилителя-ограничителя: a – для разных амплитуд входного сигнала; b – при амплитуде входного сигнала 5 мВ по результатам PVT-анализа

Fig. 6. Eye diagrams for the output signal V_{out} of a CMOS limiter amplifier: a – for different amplitudes of the input signal; b – with an input signal amplitude of 5 mV according to the results of PVT analysis

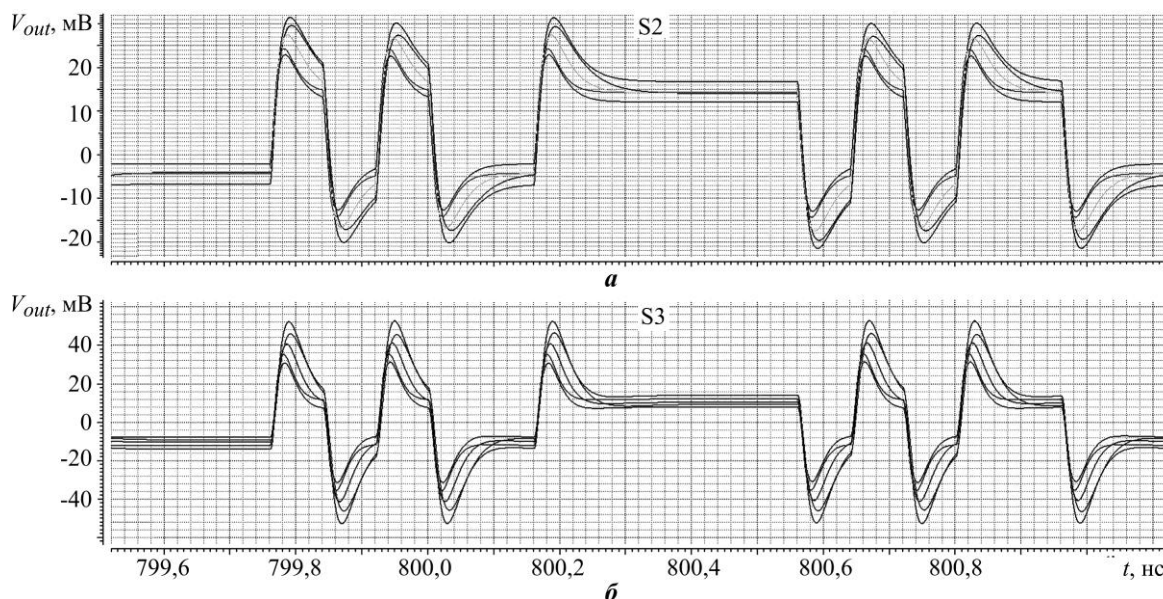


Рис. 7. Дифференциальные выходные сигналы V_{out} каскадов CTLE1 (а) и CTLE2 (б) при управляющих кодах $CS1 = CS2 = 3$, $RS1 = RS2 = 1$ и амплитуде входного сигнала 5 мВ по результатам PVT-анализа
 Fig. 7. Differential signals at the outputs V_{out} of the CTLE1 (a) and CTLE2 (b) cascades with control codes $CS1 = CS2 = 3$, $RS1 = RC2 = 1$ and an input signal amplitude of 5 mV according to the results of PVT analysis

В табл. 2 приведены параметры спроектированного усилителя-ограничителя и аналогичных устройств [7, 9, 8], выполненных по КМОП-технологии, не использующих индуктивную коррекцию и рассчитанных на работу при скорости передачи не менее 10 Гбит/с.

Параметры КМОП-усилителей-ограничителей

Таблица 2

Table 2

Parameters of CMOS limiter amplifiers

Параметр	[7]	[9]	[8]	Настоящая работа
Напряжение питания, В	1,8	0,9	1,5	0,9
Скорость передачи, Гбит/с	10	20	25	12,5
Полоса пропускания, ГГц	10,3	18	18,5	10,8–17,7
Коэффициент усиления, дБ	44,5	38,5	36,8	37,6–47,1
Потребляемая мощность, мВт	226	61	17,3	6,6–9,7
Энергетическая эффективность, пДж/бит	22,6	3,05	0,69	0,53–0,78

Следует учитывать, что результаты работ [7, 8] относятся к изготовленным образцам, а результаты, приведенные в работе [9], и результаты настоящей работы получены в ходе моделирования. Поскольку среди других параметров усилителей-ограничителей во многих работах фигурируют полоса пропускания BW и коэффициент усиления GAIN линейной части усилителей-ограничителей, эти параметры также определены в настоящей работе по результатам PVT-анализа (см. табл. 2). Как следует из табл. 2, спроектированный КМОП-усилитель-ограничитель находится на уровне аналогичных разработок последних лет по коэффициенту усиления линейной части и энергетической эффективности.

Заключение. Результаты расчетов показали, что спроектированный по стандартной субмикронной КМОП-технологии усилитель-ограничитель для приемника сигнала

оптической линии имеет максимальную скорость передачи 12,5 Гбит/с, чувствительность по входу не хуже 5 мВ, встроенные средства цифровой перестройки параметров и высокую энергетическую эффективность по сравнению с аналогичными устройствами.

Литература

1. A 26-Gb/s CMOS optical receiver with a reference-less CDR in 65-nm CMOS / *Q. Pan, X. Luo, Zh. Li et al.* // J. Semicond. 2022. Vol. 43. No. 7. Art. No. 072401. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/43/7/072401>
2. *García-Montesdeoca J. C., Montiel-Nelson J. A., Sosa J.* High gain, low noise and power transimpedance amplifier based on second generation voltage conveyor in 65 nm CMOS technology // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 16. Art. No. 5997. <https://doi.org/10.3390/s22165997>
3. *Chen W.-Z., Lu C.-H.* Design and analysis of a 2.5-Gbps optical receiver analog front-end in a 0.35- μ m digital CMOS technology // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2006. Vol. 53. No. 4. P. 977–983.
4. *Zhou G., Mao L., Xie Sh., Min Ch.* A 30 Gbps 1.25 pJ/b CMOS receiver analog front-end with low supply voltage // IEICE Electronics Express. 2021. Vol. 18. No. 8. Art. ID: 20210114. <https://doi.org/10.1587/elex.18.20210114>
5. High-speed receiver based on waveguide germanium photodetector wire-bonded to 90nm SOI CMOS amplifier / *H. Pan, S. Assefa, W. M. J. Green et al.* // Opt. Express. 2012. Vol. 20. Iss. 16. P. 18146–18155. <https://doi.org/10.1364/OE.20.018145>
6. An inductorless CMOS limiting amplifier with stream-mode active feedback / *Sh. Xie, Y. Wu, S.-C. Wu et al.* // IEICE Electronics Express. 2018. Vol. 15. Iss. 17. Art. ID: 20180640. <https://doi.org/10.1587/elex.15.20180640>
7. *Chen H.-L., Chen Ch.-H., Yang W.-B., Chiang J.-Sh.* Inductorless CMOS receiver front-end circuits for 10-Gb/s optical communications // JASE. 2009. Vol. 12. Iss. 4. P. 449–458. <https://doi.org/10.6180/jase.2009.12.4.09>
8. *Xie Sh., Shi D., Zhou G., Mao L.* An energy- and area-efficient limiting amplifier with interleaving feedback for 25 Gb/s optical receiver // IEICE Electronics Express. 2021. Vol. 18. Iss. 8. Art. ID: 20210112. <https://doi.org/10.1587/elex.18.20210112>
9. *He R., Xu J., Yan N., Hao M.* A 20 Gb/s limiting amplifier in 65nm CMOS technology // 2013 IEEE 10th International Conference on ASIC. Shenzhen: IEEE, 2013. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ASICON.2013.6811865>

Статья поступила в редакцию 27.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.07.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Раннев Николай Юрьевич – начальник лаборатории АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), nrannev@elvees.com

Кондратенко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), skondratenko@elvees.com

Дубинский Алексей Васильевич – кандидат технических наук, начальник отдела АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), dav@elvees.com

Горшкова Наталья Михайловна – кандидат технических наук, начальник лаборатории АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), ngorshkova@elvees.com

Скок Дмитрий Владимирович – директор по проектированию АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), dskok@elvees.com

References

1. Pan Q., Luo X., Li Zh., Jia Zh., Chen F., Ding X., Yue C. P. A 26-Gb/s CMOS optical receiver with a reference-less CDR in 65-nm CMOS. *J. Semicond.*, 2022, vol. 43, no. 7, art. no. 072401. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/43/7/072401>
2. García-Montesdeoca J. C., Montiel-Nelson J. A., Sosa J. High gain, low noise and power transimpedance amplifier based on second generation voltage conveyor in 65 nm CMOS technology. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 16, art. no. 5997. <https://doi.org/10.3390/s22165997>
3. Chen W.-Z., Lu C.-H. Design and analysis of a 2.5-Gbps optical receiver analog front-end in a 0.35- μm digital CMOS technology. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2006, vol. 53, no. 4, pp. 977–983.
4. Zhou G., Mao L., Xie Sh., Min Ch. A 30 Gbps 1.25 pJ/b CMOS receiver analog front-end with low supply voltage. *IEICE Electronics Express*, 2021, vol. 18, no. 8, art. ID: 20210114. <https://doi.org/10.1587/elex.18.20210114>
5. Pan H., Assefa S., Green W. M. J., Kuchta D. M., Schow C. L., Rylyakov A. V., Lee B. G., Baks Ch. W. et al. High-speed receiver based on waveguide germanium photodetector wire-bonded to 90nm SOI CMOS amplifier. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, iss. 16, pp. 18145–18155. <https://doi.org/10.1364/OE.20.018145>
6. Xie Sh., Wu Y., Wu S.-C., Gu Y.-Zh., Yang J., Mao L.-H., Chen Y., Zhang J.-L. An inductorless CMOS limiting amplifier with stream-mode active feedback. *IEICE Electronics Express*, 2018, vol. 15, iss. 17, art. ID: 20180640. <https://doi.org/10.1587/elex.15.20180640>
7. Chen H.-L., Chen Ch.-H., Yang W.-B., Chiang J.-Sh. Inductorless CMOS receiver front-end circuits for 10-Gb/s optical communications. *JASE*, 2009, vol. 12, iss. 4, pp. 449–458. <https://doi.org/10.6180/jase.2009.12.4.09>
8. Xie Sh., Shi D., Zhou G., Mao L. An energy- and area-efficient limiting amplifier with interleaving feedback for 25 Gb/s optical receiver. *IEICE Electronics Express*, 2021, vol. 18, iss. 8, art. ID: 20210112. <https://doi.org/10.1587/elex.18.20210112>
9. He R., Xu J., Yan N., Hao M. A 20 Gb/s limiting amplifier in 65nm CMOS technology. *2013 IEEE 10th International Conference on ASIC*. Shenzhen, IEEE, 2013, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ASICON.2013.6811865>

The article was submitted 27.06.2023; approved after reviewing 05.07.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Nikolay Yu. Rannev – Head of the Laboratory, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), nrannev@elvees.com

Sergey V. Kondratenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), skondratenko@elvees.com

Alexey V. Dubinsky – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), dav@elvees.com

Natalia M. Gorshkova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), ngorshkova@elvees.com

Dmitry V. Skok – Director of Design, JSC SPC “ELVEES” (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), dskok@elvees.com

Особенности TCAD- и SPICE-моделирования удара заряженной частицы в 6Т-ячейку статической памяти, изготовленную по КМОП-технологии с проектными нормами 28 нм

К. О. Петросянц^{1,2}, Д. С. Силкин¹, Д. А. Попов¹, М. Р. Исмаил-Заде¹,
И. А. Харитонов¹, Л. Е. Переверзев³, А. А. Морозов³, П. В. Тургенев³

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук, г. Москва, Россия

³ООО «Альфачип», г. Москва, Россия

kpetrosyants@hse.ru

Аннотация. С уменьшением размеров транзисторов возникают условия, когда удар одной частицы затрагивает сразу несколько транзисторов в составе ячейки памяти. Вследствие этого при моделировании недостаточно учитывать один транзистор, в который непосредственно попадает частица. В работе рассмотрена полноразмерная 3D-модель двух *n*-канальных транзисторов, являющихся частью 6Т-ячейки памяти, в которую ударяет заряженная частица. Предложен способ моделирования удара частицы, который позволяет рассчитать в TCAD-симуляторе импульс тока после удара, а в SPICE-симуляторе с применением SPICE-моделей – реакцию схемы ячейки памяти на удар. Данный способ дает возможность объединить преимущества TCAD- и SPICE-расчетов и добиться соответствия между точностью и скоростью проведения моделирования. Рассмотрены вопросы определения параметров TCAD-модели удара частицы, возникновения импульса тока после удара частицы рядом с транзистором во включенном состоянии, а также влияния тока этого транзистора на работу ячейки памяти. Предложен прием задания в TCAD-симуляторе сложных профилей распределения носителей заряда, индуцированных ударом частицы. Проведено моделирование нескольких случаев удара частиц с разными значением LET (Linear Energy Transfer) и показан пример определения критического значения LET для 6Т-ячейки статической памяти с проектными нормами 28 нм. Подобранные параметры физической структуры транзистора позволяют моделировать характеристики транзисторов, произведенных по КМОП-технологии с проектными нормами 28 нм.

Ключевые слова: ячейка памяти, статическая память, удар частицы, TCAD-моделирование, SPICE-моделирование

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Программы «Приоритет-2030» в рамках стратегического проекта НИУ ВШЭ «Цифровая трансформация: технологии, эффекты, эффективность» и РНФ (проект № 23-22-00313).

Для цитирования: Особенности TCAD- и SPICE-моделирования удара заряженной частицы в 6Т-ячейку статической памяти, изготовленную по КМОП-технологии с проектными нормами 28 нм / К. О. Петросянц, Д. С. Силкин, Д. А. Попов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 826–837. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-826-837>. – EDN: XCTUXL.

Original article

Features of TCAD and SPICE simulation of a charged particle impact into a 6T SRAM cell manufactured using CMOS 28nm technology node

*K. O. Petrosyants^{1,2}, D. S. Silkin¹, D. A. Popov¹, M. R. Ismail-Zade¹,
I. A. Kharitonov¹, L. E. Pereverzev³, A. A. Morozov³, P. V. Turgenev³*

¹*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

²*Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*“AlphaCHIP” LLC, Moscow, Russia*

kpetrosyants@hse.ru

Abstract. With a decrease in the size of transistors, the conditions arise when the impact of one particle affects several transistors in the composition of a memory cell. Therefore during simulation it is not sufficient to take account for one transistor directly hit by a particle. In this work, a full-size 3D model of two *n*-channel transistors that are part of a 6T memory cell into which the charged particle enters is considered. A particle impact simulation procedure is proposed that makes it possible to calculate in TCAD simulator the current pulse after the impact and in SPICE simulator, using SPICE models, the memory cell circuit response to the impact. This procedure allows for combination of TCAD and SPICE calculations advantages and for a good compromise between accuracy and simulation speed. The issues of determining the parameters of the TCAD model of a particle impact, as well as the occurrence of a current pulse after a particle impact near a transistor in the on state, along with the effect of the current of this transistor on the operation of a memory cell, are considered. A technique of specifying in TCAD simulator the complex distribution profiles of charge carriers induced by particle impact is proposed. Several cases of particle impact with different LET (Linear Energy Transfer) values have been simulated and an example of determining the critical LET for a 6T SRAM cell with a design code of 28 nm has been shown. The tailored parameters of transistor physical structure make it possible to simulate the characteristics of transistors manufactured using CMOS 28nm technology node.

Keywords: SRAM, static memory, particle impact, TCAD simulation, SPICE simulation

Funding: the work has been supported by the Priority 2030 Program within the framework of the HSE strategic project “Digital Transformation Technology, Effects, Efficiency” and the Russian Science Foundation (project No. 23-22-00313).

For citation: Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A., Ismail-Zade M. R., Kharitonov I. A., Pereverzev L. E., Morozov A. A., Turgenev P. V. Features of TCAD and SPICE simulation of a charged particle impact into a 6T SRAM cell manufactured using CMOS 28nm technology node. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 826–837. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-826-837>. – EDN: XCTUXL.

Введение. Одиночный удар заряженной частицы (Single Event Upset, SEU) – одна из ключевых причин возникновения ошибок в работе ячеек статической памяти. Оценка стойкости ячейки памяти к SEU является важной задачей для устройств, предназначенных для работы в условиях верхних слоев атмосферы или открытого космоса. На этапе проектирования для реализации этой задачи используются средства компьютерного моделирования, позволяющие оценивать стойкость схем памяти при использовании различных конструктивно-технологических и схемотехнических решений. С точки зрения физики удар частицы приводит к ионизации атомов полупроводника, в результате чего образуется значительное число свободных электронно-дырочных пар (ЭДП), которые разделяются в электрическом поле и под действием диффузии и дрейфа движутся к контакту под напряжением [1]. Эти носители заряда могут формировать кратковременный импульс тока, которого может быть достаточно для переключения ячейки памяти в противоположное состояние.

Вероятность возникновения SEU после удара частицы зависит от следующих факторов. Во-первых, необходимо правильно оценить форму и величину импульса тока, формируемого избыточными носителями. С этой целью следует учитывать скорость движения носителей, а также скорость их рекомбинации в теле полупроводникового прибора. Важную роль здесь будут играть топологические и физические параметры структуры. Решение такой задачи требует применения TCAD-моделирования, которое позволяет принять во внимание особенности внутреннего устройства полупроводниковых приборов. Во-вторых, важно рассмотреть влияние этого импульса на работу конкретной ячейки памяти. Основным результатом воздействия импульса является перезарядка входных емкостей транзисторов ячейки, изменяющая логическое состояние ячейки памяти. При этом следует учитывать соотношения размеров транзисторов и паразитные параметры схемы, а также принимать во внимание динамические характеристики работы ячейки памяти, которые могут оказывать решающее влияние на результат воздействия частицы на схему.

TCAD-моделирование не является оптимальным инструментом для проведения точных расчетов стойкости с учетом подобных схемотехнических параметров. Для этих целей целесообразно использовать SPICE-моделирование с применением схемотехнических моделей. Существуют два основных подхода к проведению подобных расчетов. Первый подход – создание полных 3D-моделей ячейки памяти [2, 3]. Этот подход потенциально наиболее точный, однако есть ограничения по его практическому применению. Такую модель сложно разработать, каждая симуляция будет занимать время порядка нескольких десятков часов, а внесение каких-либо изменений в схему ячейки, вероятно, потребует повторения всей работы. Создание такой модели с учетом паразитных параметров также потребует детальной информации о технологическом процессе – не только о структуре отдельного транзистора, но и об устройстве многослойной металлизации. Такие сведения не всегда могут быть получены от производителя

или экстрагированы из измерений либо технической информации, приводимой в открытых источниках. Второй подход – применение смешанного TCAD- и SPICE-моделирования, когда удар частицы моделируется в части структуры, представленной TCAD-моделью, а все, что не вошло в эту модель, представляется в виде внешней схемы, состоящей из SPICE-моделей [4, 5]. Однако практика показывает, что пакеты для TCAD-моделирования не всегда имеют необходимый функционал, чтобы распознавать и использовать наиболее современные и точные SPICE-модели. Кроме того, взаимодействие TCAD- и SPICE-моделей в одной схеме при расчете сверхбыстрых переходных процессов, длящихся несколько десятков пикосекунд, часто приводит к численной нестабильности и заканчивается ошибками.

В настоящей работе используется смешанный подход: TCAD-моделирование применяется для расчета импульса тока, затем этот импульс переносится в SPICE-симулятор в виде кусочно-линейного источника тока. При этом в TCAD-модели учитываются наиболее важные факторы, влияющие на формирование импульса тока, а в SPICE-модель вводятся паразитные и стресс-параметры, а также наиболее точные модели транзисторов, обеспечивающие максимальную точность симуляции реакции схемы ячейки памяти на импульс тока.

Описание TCAD-модели МОП-структур с ударом тяжелой частицы. Для моделирования удара частицы принципиально важно использовать 3D-модели транзисторных структур, так как концентрация ЭДП, индуцированных ударом частицы, изменяется по всем осям координат, а использование 2D-моделей приведет к существенной погрешности.

При моделировании за основу взята структура 28-нм *n*-МОП-транзистора, откалиброванная по данным, опубликованным компанией TSMC [6]. Основные параметры структуры, имеющие значения с точки зрения моделирования удара частицы: концентрация примеси в подложке $3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, концентрация примеси в областях стока и истока $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, эквивалентная толщина оксида кремния 1,35 нм. Результаты калибровки сток-затворных ВАХ показаны на рис. 1. Погрешность моделирования не превышает 15 %.

Для моделирования удара частицы выбрана спаренная структура транзистора (на один сток приходится два параллельно включенных истока и затвора). TCAD-модель такой структуры представлена на рис. 2. Модель содержит два *n*-МОП-транзистора, подключенных к обоим плечам ячейки памяти.

На основании опыта по TCAD-моделированию МОП-структур с размерами от долей микрометра до единиц нанометров [7] верифицированы следующие модели физических эффектов. Для учета деградации подвижности в инверсном слое МОП-структуры применялись модели: Enormal (IALMob Coulomb2D) – модель деградации подвижности у поверхности с двумерным распределением дефектов на границе раздела; CarrierCarrierScattering (BrooksHerring) – модель деградации подвижности из-за рассеяния носителей на других носителях заряда; DopingDependence (PhuMob BalMob) –

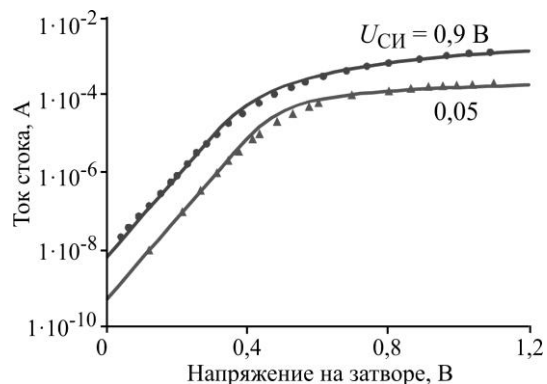


Рис. 1. Сток-затворные ВАХ *n*-МОП-транзистора: условные обозначения – данные работы [6]; кривые – TCAD-моделирование
 Fig. 1. IdVg characteristics of *n*-MOSFETs: symbols – according to work [6]; curves – TCAD simulation

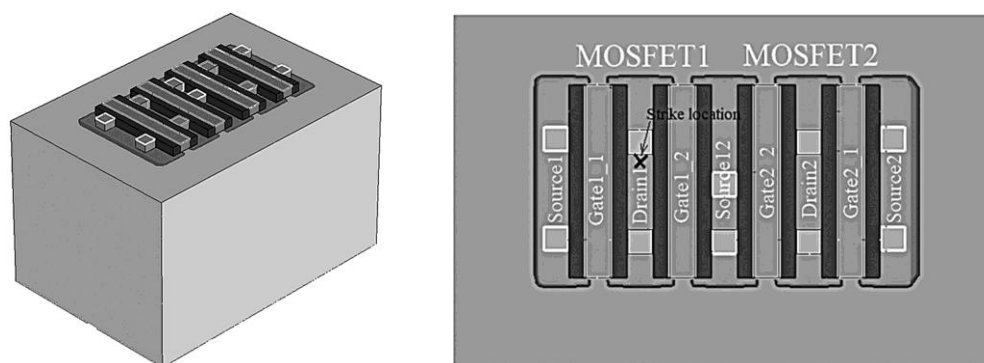


Рис. 2. TCAD-модель двух спаренных n -канальных транзисторов
 Fig. 2. TCAD model of two paired n -channel transistors

модель зависимости подвижности от уровня легирования, также включающая учет баллистического пролета носителей в короткоканальных транзисторах. Сужение запрещенной зоны учитывалось с помощью модели Slotboom, генерация-рекомбинация носителей – с использованием модели Шокли – Холла – Рида с учетом зависимости скорости рекомбинации от концентрации носителей. Данный набор моделей хорошо зарекомендовал себя при моделировании различных МОП-структур с длинами канала от 15 до 100 нм [8, 9], включая транзисторы компании TSMC, результаты моделирования которых представлены на рис. 1.

Моделирование удара частицы. Удар частицы в Sentaurus TCAD моделируется путем создания дополнительного цилиндрического профиля ЭДП, отображающих ионизацию носителей заряда частицей. Концентрация ЭДП по умолчанию постоянна вдоль оси цилиндра, которая отображает трек частицы в материале. В радиальном направлении концентрация ЭДП спадает по нормальному распределению Гаусса. Профиль ЭДП определяется тремя параметрами: длиной трека частицы; стандартным отклонением профиля ЭДП в радиальном направлении; линейной передачей энергии (Linear Energy Transfer, LET), задаваемой в пКл/мкм. LET определяет полный заряд в цилиндрическом профиле с длиной трека 1 мкм. LET в пКл/мкм пересчитывается из экспериментально определяемых значений, выраженных в МэВ·см²/мг, исходя из соотношения 1 пКл/мкм = 97 МэВ·см²/мг [10]. Длина трека может быть рассчитана по энергии частицы, однако на практике для МОП-структур с размерами транзисторов менее 100 нм вклад в всплеск тока вносит ограниченная часть трека. ЭДП могут перемещаться под действием диффузии или дрейфа в области пространственного заряда в течение времени, пока не произойдет рекомбинация. Носители, которые не успели «добраться» до контакта стока за это время, рекомбинируют в объеме полупроводника. Моделирование нанометровых МОП-транзисторов показывает, что ЭДП, образованные на глубине не свыше 400 нм, не вносят вклад в всплеск тока стока. Стандартное отклонение профиля ЭДП в радиальном направлении не может быть однозначно вычислено. Однако существуют работы, показывающие, что частота возникновения SEU в приборах может быть уменьшена более чем в 100 раз, если чувствительные области ИС будут удалены друг от друга на 1 мкм [11]. Профиль ЭДП имеет сложную форму [12], которую в первом приближении можно аппроксимировать с помощью суммы нескольких гауссовых профилей (рис. 3).

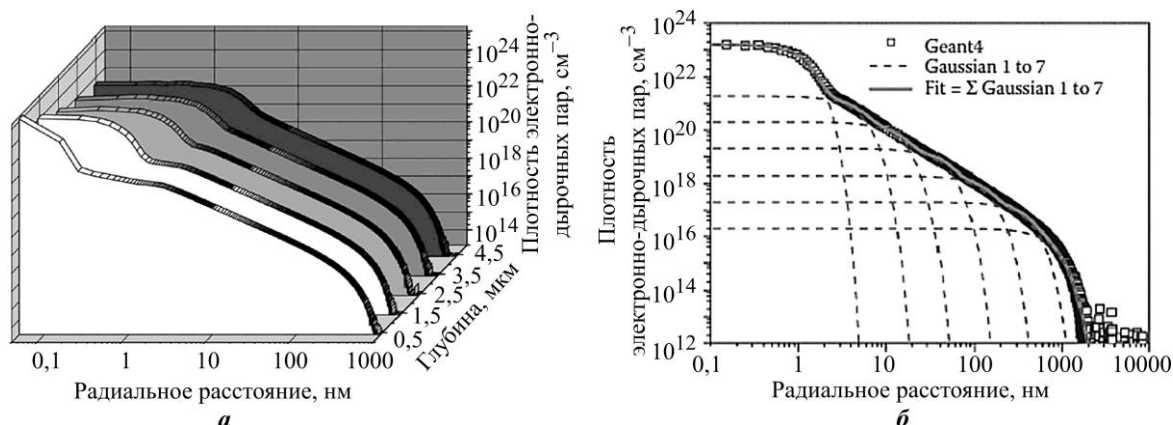


Рис. 3. Зависимости концентрации электронно-дырочных пар, индуцированных частицей, от радиуса вокруг пути прохождения частицы: *a* – по данным работы [13]; *b* – по данным работы [14]
 Fig. 3. Dependences of the concentration of electron-hole pairs induced by a particle on the radius around the path of the particle: *a* – according to work [13]; *b* – according to work [14]

Для упрощения модели авторы настоящей статьи использовали два профиля: профиль, отвечающий за область высоких концентраций, непосредственно примыкающую к пути движения частицы, и профиль, отвечающий за генерацию носителей на большом удалении от него. Среднеквадратичное отклонение первого профиля задано равным 10 нм, второго – 200 нм. Значение LET узкого профиля брали равным 1/10 от значения LET широкого профиля, чтобы концентрация ЭДП в пике узкого профиля на два порядка превышала концентрацию ЭДП в точке соединения профилей (см. рис. 3).

Обеспечение взаимодействия TCAD- и SPICE-моделей. При подготовке TCAD-модели для удара частицы и переноса данных в SPICE-симулятор необходимо учитывать несколько факторов. Носители заряда, формирующие импульс тока, движутся по двум механизмам. Сначала происходит разделение ЭДП, попавших в электрическое поле стока, при этом носители заряда двигаются под действием дрейфа в поле стока. По мере вытягивания носителей из области стока образуется градиент концентрации свободных носителей заряда, что приводит к диффузии носителей к стоку из подложки. Параллельно происходит рекомбинация носителей заряда. Для логических схем, работающих при малых напряжениях, ширина области пространственного заряда, где напряженность электрического поля высока и может происходить разделение носителей заряда, очень мала. В рассматриваемой структуре она составляет около 20 нм. Следовательно, большую часть «маршрута» из подложки в область стока носители проходят под действием диффузии. Таким образом, существует конечное расстояние от стока, которое могут пройти носители заряда, прежде чем они подвергнутся рекомбинации. TCAD-расчеты показывают, что это расстояние не превышает ≈ 500 нм [15]. Следовательно, модель должна учитывать не только транзисторную структуру, но и окружающее ее пространство в радиусе, по крайней мере, 500 нм вокруг стока.

Поскольку большое значение в рассматриваемом случае имеет диффузионный механизм, не зависящий от внешнего напряжения, напряжение на стоке не оказывает определяющего воздействия на формирование импульса тока. Для оценки этого влияния смоделирован импульс тока при напряжениях на стоке 0,9 и 1,5 В. Конденсатор, имитирующий емкости транзисторов ячейки и паразитные емкости, на перезарядку которых расходуется заряд импульса тока, подключен к стоку. Результаты моделирования показаны на рис. 4, откуда следует, что при увеличении напряжения на 67 % рост тока на пике импульса составляет 15 %, а заряд увеличивается на 10 %. Это показывает, что

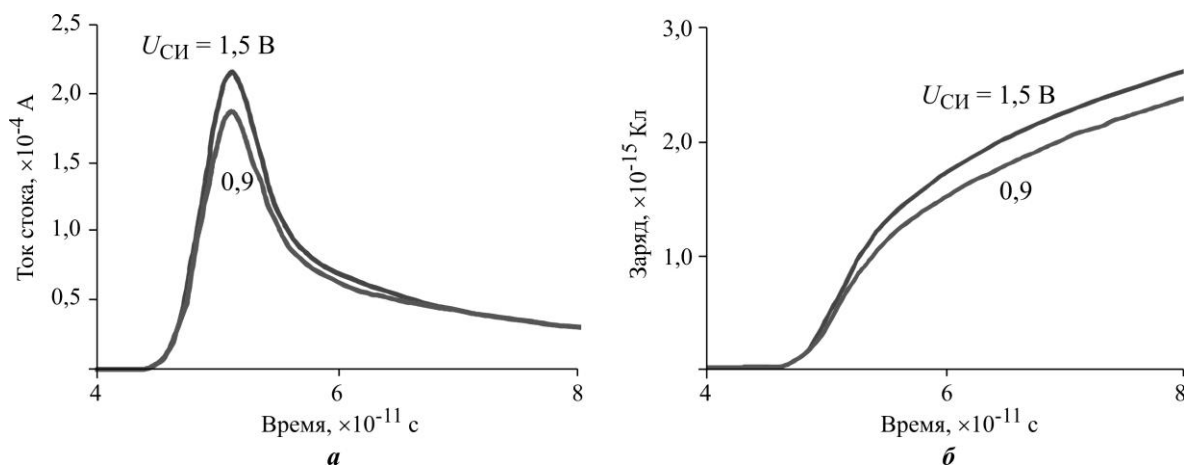


Рис. 4. Смоделированные с помощью TCAD импульсы тока стока МОП-транзистора (а) и интеграла от тока по времени (б) при ударе частицы при разных напряжениях на стоке
 Fig. 4. TCAD simulation of MOSFET drain current (a) and integral of current over time (b) at particle impact, at different MOSFET drain voltages

внешние условия слабо влияют на транзистор при ударе частицы, а дрейфовый механизм практически перестает влиять на процесс формирования импульса тока после того, как был пройден пик.

По мере перезарядки емкостей затворов и паразитных емкостей с подключенным к ним стоком *n*-МОП-транзистора, в который ударила частица, напряжение на нем будет уменьшаться и вместе с ним будет уменьшаться область пространственного заряда, в которой носители движутся под действием дрейфа. Поскольку только перезарядка этих емкостей оказывает влияние на движение носителей в моделируемой структуре, для упрощения работы и сокращения времени моделирования можно заменить схему ячейки памяти в TCAD на конденсатор, подключенный к стоку и заряженный до уровня напряжения питания. Значение емкости конденсатора в идеальном случае должно быть равно сумме емкостей затворов и паразитных емкостей соединений, подключенных к стоку моделируемого транзистора. Если точно определить значения этих величин не представляется возможным, использование завышенных значений емкости является более предпочтительным, так как это не завышает стойкости ячейки.

Общим для всех симуляторов является то, что численное решение системы уравнений находится для ограниченного числа точек, между которыми изменение рассчитываемых значений считается линейным. Аналогично происходит определение тока при использовании кусочно-линейного источника. Если экстрагировать из результатов TCAD-моделирования массив значений тока и времени, а затем перенести его в модель кусочно-линейного источника тока в SPICE-модели, дополнительная погрешность в результате такого переноса не возникнет.

Моделирование ячейки памяти при ударе частицы и оценка критического заряда для 6Т-ячейки памяти. Схема 6Т-ячейки памяти с обозначением основных узлов и дополнительных кусочно-линейных источников тока, имитирующих импульсы тока в *n*-МОП-транзисторах, приведена на рис. 5.

Область, в которой образуются ЭДП, индуцированные ударом частицы, захватывает оба *n*-МОП-транзистора (MOSFET1 и MOSFET2). При этом сток MOSFET1 имеет высокий потенциал и притягивает электроны, а сток второго имеет низкий потенциал и притягивает дырки. MOSFET2 находится в открытом состоянии, его исток также имеет низкий потенциал, а между стоком и истоком находится проводящий канал, поэтому,

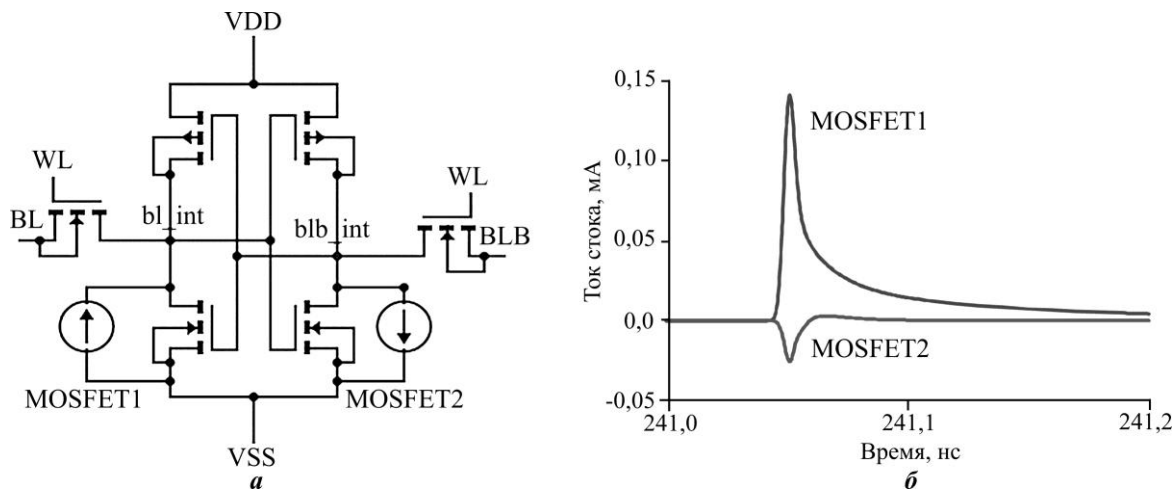


Рис. 5. Схема 6Т-ячейки памяти с кусочно-линейными источниками тока (а) и импульс тока после удара частицы с LET 4,365 МэВ·см²/мг в двух n-МОП-транзисторах (б) (на сток n-MOSFET1 подано положительное напряжение питания, на стоке n-MOSFET2 – ноль)

Fig. 5. Circuit of a 6T memory cell with piecewise linear current sources (a) and a current pulse after a particle impact with LET 4.365 MeV·cm²/mg in two n-MOSFETs (b) (a positive supply voltage is applied to the n-MOSFET1 drain, zero is applied to the n-MOSFET2 drain)

как правило, этот транзистор игнорируется при расчете SEU. Однако, поскольку речь идет о временах порядка единиц пикосекунд, можно ожидать возникновения небольшого импульса тока в этом транзисторе. Этот импульс может влиять на переключение схемы. Оба импульса приведены на рис. 5, из которого видно, что в транзисторах MOSFET1 и MOSFET2 пики всплесков достигаются одновременно. Отрицательные значения тока MOSFET2 отражают другое направление протекания тока. В пике ток транзистора MOSFET2 составляет около 15 % от тока транзистора MOSFET1. При учете тока только в MOSFET1 напряжение на узле bl_int уменьшается на 0,505 В. При учете обоих токов спад напряжения составляет 0,533 В. Видно, что всплеск тока в MOSFET2 незначительно влияет на переключение схемы.

Результаты SPICE-моделирования воздействия удара частицы с разными значениями LET на ячейку памяти в режиме хранения информации приведены на рис. 6. Из рисунка следует, что сбой (SEU) происходит при наименьшем значении LET = 3,1525 МэВ·см²/мг. Собранный заряд при этом составляет $2,9 \cdot 10^{-15}$ Кл \approx 2,9 фКл. В литературе можно найти данные о том, что для 32-нм технологии критический заряд в 6Т-ячейке составляет порядка 2 фКл [16]. Полученное превышенное значение критического заряда по сравнению с литературными данными, скорее всего, обусловлено увеличенными размерами n-канальных МОП-транзисторов: длина канала составляет 40 нм, ширина – порядка 600 нм.

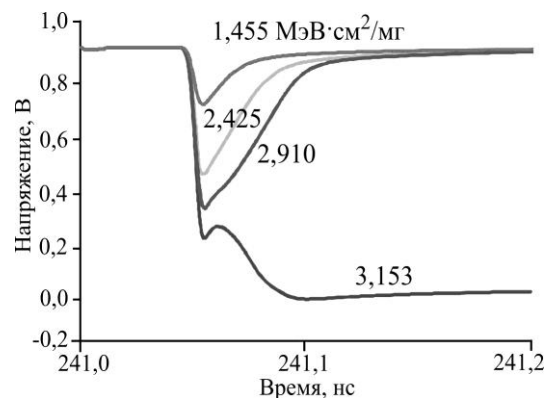


Рис. 6. Результат SPICE-моделирования напряжений в узлах bl_int, blb_int с учетом переноса из TCAD импульсов тока от ударов частиц с различными LET

Fig. 6. The result of SPICE simulation of voltages in nodes bl_int, blb_int, taking into account the transfer from TCAD of current pulses from particle impacts with different LET

Транзисторы с такими размерами имеют более высокую входную емкость, что положительно сказывается на стойкости к удару частицы.

Таким образом, полученные результаты TACD- и SPICE-моделирования стойкости ячейки памяти сопоставимы с литературными и экспериментальными данными других авторов.

Заключение. В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты. Подобранные параметры физической структуры *n*-МОП-транзисторов позволяют моделировать характеристики транзисторов, созданных по 28-нм технологическому процессу. Разработанная 3D-TCAD-модель двух спаренных *n*-МОП-транзисторов учитывает воздействие удара частицы на соседние транзисторы. Отработанная методика моделирования дает возможность на основе уравнений физики полупроводников рассчитать в TCAD-системе импульс тока, вызванный воздействием тяжелой заряженной частицы, а затем без дополнительной погрешности передать данные в SPICE-систему, где воздействие импульса тока на рассматриваемую схему оценивается с применением SPICE-моделей компонентов схемы и паразитных параметров МОП-структур. Результаты моделирования воздействия удара частицы в закрытый *n*-МОП-транзистор и на близкорасположенный открытый *n*-МОП-транзистор в ячейке памяти показывают, что импульс тока в соседнем транзисторе способен дополнительно до 5 % уменьшить напряжение в уязвимом узле *bl_int*. При использовании транзисторов меньших размеров или в случаях, когда частица бьет под углом, это значение может вырасти.

Полученные результаты оценки критического значения LET частицы и критического заряда для ячейки памяти SRAM с длиной каналов МОП-транзисторов 40 нм коррелируют с результатами из литературных источников с учетом увеличенных размеров *n*-МОП-транзисторов ячейки.

Литература

1. Chechenin N. G., Kadmenskii A. G., Motawekh H., Panasyuk M. I. Impact of high-energy cosmic-ray protons and ions on the elements of spacecraft on-board devices // J. Surf. Investig. 2012. Vol. 6. Iss. 2. P. 303–313. <https://doi.org/10.1134/S1027451012040076>
2. SEU study of 4T, 6T, 7T, 8T, 10T MOSFET based SRAM using TCAD simulation / Y. V. Bhuvaneshwari, N. P. Sai, N. V. Kumar et al. // International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES 2014). Chennai: IEEE, 2014. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICICES.2014.7034119>
3. Katunin Yu. V., Stenin V. Ya. Evaluation based on TCAD simulation of failure tolerance of the elements on the cells STG DICE for 65-nm CMOS blocks of associative memory // Selected Articles of MES Conference. Iss. 4. Moscow: IPPM RAS, 2019. P. 22–27. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2019-4-22-27>
4. Wang T., Xiao L., Huang Q. Simulation study of single event effect for different N-well and Deep-N-well doping in 65nm triple-well CMOS devices // 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics. Changchun: IEEE, 2012. P. 505–509. <https://doi.org/10.1109/ICoOM.2012.6316326>
5. Fang Y.-P., Oates A. S. Neutron-induced charge collection simulation of bulk FinFET SRAMs compared with conventional planar SRAMs // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2011. Vol. 11. No. 4. P. 551–554. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2011.2168959>
6. 28nm metal-gate high-K CMOS SoC technology for high-performance mobile applications / S. H. Yang, J. Y. Sheu, M. K. Jeong et al. // 2011 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). San Jose, CA: IEEE, 2011. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/CICC.2011.6055355>
7. Попов Д. А. TCAD-моделирование сбоеустойчивости SELBOX и DSOI КМОП КНИ ячеек памяти // Междунар. форум «Микроэлектроника-2020». Школа молодых ученых «Микроэлектроника-2020»: XIII Междунар. конф. «Кремний-2020»; XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе (г. Ялта, 21–25 сент. 2020): сб. тезисов. М.: МАКС Пресс, 2020. С. 227–229.

8. TCAD-моделирование нанометровых структур FinFET на объемном кремнии с учетом воздействия радиации / **К. О. Петросянц, Д. С. Силкин, Д. А. Попов и др.** // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 374–386. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-5-374-386>. – EDN: WBYIRG.
9. **Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A.** Comparative characterization of NWFET and FinFET transistor structures using TCAD modeling // *Micromachines*. 2022. Vol. 13. Iss. 8. Art. No. 1293. <https://doi.org/10.3390/mi13081293>
10. **Kim J., Lee J.-S., Han J.-W., Meeyappan M.** Single-event transient in FinFETs and nanosheet FETs // *IEEE Electron Device Letters*. 2018. Vol. 39. No. 12. P. 1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2877882>
11. **Стенин В. Я., Степанов П. В.** Базовые элементы памяти на основе ячеек DICE для сбоеустойчивых КМОП 28 нм ОЗУ // *Микроэлектроника*. 2015. Т. 44. № 6. С. 416–427. <https://doi.org/10.7868/S0544126915060071>. – EDN: UJHRGF.
12. Impact of the radial ionization profile on SEE prediction for SOI transistors and SRAMs beyond the 32-nm technological node / **M. Raine, G. Hubert, M. Gaillardin et al.** // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2011. Vol. 58. No. 3. P. 840–847. <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2109966>
13. A 90-nm CMOS device technology with high-speed, general-purpose, and low-leakage transistors for system on chip applications / **C. C. Wu, Y. K. Leung, C. S. Chang et al.** // *Digest. International Electron Devices Meeting*. San Francisco, CA: IEEE, 2002. P. 65–68. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175780>
14. **Autran J.-L., Munteanu D.** Soft errors: From particles to circuits. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. 439 p.
15. **Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A., Ismail-Zade M. R.** Analysis of SEU effects in MOSFET and FinFET based 6T SRAM cells // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow: IEEE, 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802398>
16. **Rajendran A., Shiyanovskii Y., Wolff F., Papachristou C.** Noise margin, critical charge and power-delay tradeoffs for SRAM design // 2011 IEEE 17th International On-Line Testing Symposium. Athens: IEEE, 2011. P. 145–150. <https://doi.org/10.1109/IOLTS.2011.5993828>

Статья поступила в редакцию 21.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.07.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор, ординарный профессор-исследователь департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, Таллинская 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 Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, Таллинская ул., 34), dsilkin@hse.ru

Попов Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент департамента компьютерной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, Таллинская ул., 34), da.popov@hse.ru

Исмаил-Заде Мамед Рашидович – кандидат технических наук, старший преподаватель департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, Таллинская ул., 34), mismailzade@hse.ru

Харитонов Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, профессор департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, Таллинская ул., 34), ikharitonov@hse.ru

Переверзев Леонид Евгеньевич – технический директор ООО «Альфачип» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр.8), leonidr@alphachip.ru

Морозов Андрей Александрович – начальник отдела полупроводниковых запоминающих устройств ООО «Альфачип» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр.8), andr@alphachip.ru

Тургенев Павел Владимирович – старший инженер отдела полупроводниковых запоминающих устройств ООО «Альфачип» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр.8), turgenev@alphachip.ru

References

1. Chechenin N. G., Kadmenskii A. G., Motawekh H., Panasyuk M. I. Impact of high-energy cosmic-ray protons and ions on the elements of spacecraft on-board devices. *J. Surf. Investig.*, 2012, vol. 6, iss. 2, pp. 303–313. <https://doi.org/10.1134/S1027451012040076>
2. Bhuvaneshwari Y. V., Sai N. P., Kumar N. V., Thiruvankatesan C., Srinivasan R. SEU study of 4T, 6T, 7T, 8T, 10T MOSFET based SRAM using TCAD simulation. *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES 2014)*. Chennai, IEEE, 2014, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICICES.2014.7034119>
3. Katunin Yu. V., Stenin V. Ya. Evaluation based on TCAD simulation of failure tolerance of the elements on the cells STG DICE for 65-nm CMOS blocks of associative memory. *Selected Articles of MES Conference*, iss. 4. Moscow, IPPM RAS, 2019, pp. 22–27. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2019-4-22-27>
4. Wang T., Xiao L., Huang Q. Simulation study of single event effect for different N-well and Deep-N-well doping in 65nm triple-well CMOS devices. *2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics*. Changchun, IEEE, 2012, pp. 505–509. <https://doi.org/10.1109/ICoOM.2012.6316326>
5. Fang Y.-P., Oates A. S. Neutron-induced charge collection simulation of bulk FinFET SRAMs compared with conventional planar SRAMs. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 551–554. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2011.2168959>
6. Yang S. H., Sheu J. Y., Jeong M. K., Chiang M. H., Yamamoto T., Liaw J. J., Chang S. S., Lin Y. M. et al. 28nm metal-gate high-K CMOS SoC technology for high-performance mobile applications. *2011 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. San Jose, CA, IEEE, 2011, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/CICC.2011.6055355>
7. Popov D. A. TCAD simulation of SELBOX and DSOI CMOS SRAM failure. *Mezhdunarodnyy forum "Mikroelektronika-2020". Shkola molodykh uchenykh "Mikroelektronika-2020" = International forum "Microelectronics-2020". Young scientists scholarship "Microelectronics-2020": XIII Mezhdunar. konf. "Kremniy-2020"; XII Shkola molodykh uchenykh i spetsialistov po aktual'nym problemam fiziki, materialovedeniya, tekhnologii i diagnostiki kremniya, nanometryvnykh struktur i priborov na ego osnove (g. Yalta, 21–25 sent. 2020)*. Moscow, MAKS Press Publ., 2020, pp. 227–229. (In Russian).
8. Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A., Bo Li, Xu Zhang. TCAD modeling of nanoscale bulk FinFET structures with account of radiation exposure. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 374–386. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-5-374-386>. – EDN: WBYIRG.
9. Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A. Comparative characterization of NWFET and FinFET transistor structures using TCAD modeling. *Micromachines*, 2022, vol. 13, iss. 8, art. no. 1293. <https://doi.org/10.3390/mi13081293>
10. Kim J., Lee J.-S., Han J.-W., Meyyappan M. Single-event transient in FinFETs and nanosheet FETs. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, vol. 39, no. 12, pp. 1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2877882>
11. Stenin V. Ya., Stepanov P. V. Basic memory elements using DICE cells for fault-tolerant 28 nm CMOS RAM. *Russ. Microelectron.*, 2015, vol. 44, iss. 6, pp. 368–379. <https://doi.org/10.1134/S1063739715060074>
12. Raine M., Hubert G., Gaillardin M., Artola L., Paillet Ph., Girard S., Sauvestre J.-E., Bournel A. Impact of the radial ionization profile on SEE prediction for SOI transistors and SRAMs beyond the 32-nm technological node. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 840–847. <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2109966>
13. Wu C. C., Leung Y. K., Chang C. S., Tsai M. H., Huang H. T., Lin D. W., Sheu Y. M., Hsieh C. H. et al. A 90-nm CMOS device technology with high-speed, general-purpose, and low-leakage transistors for sys-

tem on chip applications. *Digest. International Electron Devices Meeting*. San Francisco, CA, IEEE, 2002, pp. 65–68. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175780>

14. Autran J.-L., Munteanu D. *Soft errors: From particles to circuits*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2015. 439 p.

15. Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A., Ismail-Zade M. R. Analysis of SEU effects in MOSFET and FinFET based 6T SRAM cells. *2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. Moscow, IEEE, 2022, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802398>

16. Rajendran A., Shiyankovskii Y., Wolff F., Papachristou C. Noise margin, critical charge and power-delay tradeoffs for SRAM design. *2011 IEEE 17th International On-Line Testing Symposium*. Athens, IEEE, 2011, pp. 145–150. <https://doi.org/10.1109/IOLTS.2011.5993828>

The article was submitted 21.07.2023; approved after reviewing 27.07.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ordinary Research Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 123592, Moscow, Tallinskaya st., 34), Chief Researcher, Institute of Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Sovetskaya st., 3), kpetrosyants@hse.ru

Denis S. Silkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 123592, Moscow, Tallinskaya st., 34), dsilkin@hse.ru

Dmitriy A. Popov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computer Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 123592, Moscow, Tallinskaya st., 34), da.popov@hse.ru

Mamed R. Ismail-Zade – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 123592, Moscow, Tallinskaya st., 34), mismailzade@hse.ru

Igor A. Kharitonov – Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 123592, Moscow, Tallinskaya st., 34), ikharitonov@hse.ru

Leonid E. Pereverzev – Technical Director, “AlphaCHIP” LLC (Russia, 124498, Moscow, Shokin sq., 1, bld. 8), leonidp@alphachip.ru

Andrey A. Morozov – Head of the Semiconductor Storage Devices Department, “AlphaCHIP” LLC (Russia, 124498, Moscow, Shokin sq., 1, bld. 8), andr@alphachip.ru

Pavel V. Turgenev – Senior Engineer of the Semiconductor Storage Devices Department, “AlphaCHIP” LLC (Russia, 124498, Moscow, Shokin sq., 1, bld. 8), turgenev@alphachip.ru

Научная статья
УДК 004.052.32+681.518.5
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-6-838-853
EDN: FKEARG

Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету

II. Моделирование работы цифровых устройств при неисправностях

Д. В. Ефанов^{1,2}, Т. С. Погодина²

*¹Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия*

²Российский университет транспорта, г. Москва, Россия

TrES-4b@yandex.ru

Аннотация. Высоконадежные и безопасные системы управления строятся с использованием разнообразных подходов, в том числе контроля вычислений в блоках и узлах по различным диагностическим признакам. Традиционно для синтеза данных систем применяются методы, основанные на внесении модульной избыточности. Однако существуют подходы, реализуемые с использованием свойств самодвойственных функций совместно с кодовыми методами контроля вычислений, что позволяет уменьшить структурную избыточность конечных устройств. В работе проведен анализ свойств самодвойственных отказоустойчивых структур с контролем вычислений по паритету. Две структуры из пяти основаны на использовании дублирования с контролем вычислений по паритету, две другие – на использовании единственного устройства с блоком фиксации искаженных сигналов, реализуемым на основе известного метода логической коррекции сигналов. Пятая структура представляет собой обобщение четвертой структуры, где контроль вычислений по паритету осуществлен для блоков дополнения и формирования функций коррекции. Описан эксперимент по анализу обнаруживающих характеристик для произвольного комбинационного устройства при внесении в его структуру одиночных константных неисправностей на выходах внутренних элементов. Анализируемые структуры дают возможность построения отказоустойчивых цифровых устройств с уменьшенными показателями структурной избыточности по сравнению с широко используемым подходом, основанным на применении тройной модульной избыточности с мажоритарной коррекцией. Пока-

зано, что корректирующая способность отказоустойчивых структур определяется свойствами выбранного для контроля вычислений кода паритета. Установлены особенности обнаружения ошибок каждой из структур при действии одиночных неисправностей в их блоках. Они могут быть использованы на практике при реализации вычислительных устройств и систем на современной программируемой элементной базе.

Ключевые слова: отказоустойчивые устройства, самодвойственные устройства, коррекция ошибок, контроль вычислений по паритету, самодвойственное тестирование

Для цитирования: Ефанов Д. В., Погодина Т. С. Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. II. Моделирование работы цифровых устройств при неисправностях // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 6. С. 838–853. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-838-853>. – EDN: FKEAPG.

Original article

Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code II. Modeling the operation of digital devices in case of faults

D. V. Efanov^{1,2}, T. S. Pogodina²

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

²*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

TrES-4b@yandex.ru

Abstract. Ultra-reliable and safety control systems are built using various approaches, including calculations checking in blocks and nodes by different diagnostic signs. Traditionally, methods based on the introduction of modular redundancy are used for the synthesis of these systems. However, approaches can be applied that will reduce the structural redundancy of end devices. They can be implemented using the properties of self-dual functions together with code methods for calculations checking. In this work, the properties of self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code are analyzed. Two of the five structures are based on the use of duplication with calculations checking by parity code, and the other two, on the use of a single device with a block for distorted signals fixing implemented on the basis of the known Boolean method of signal correction. The fifth structure is a generalization of the fourth structure, where the calculations checking of parity is carried out for the blocks of addition and formation of correction functions. An experiment to analyze the detecting characteristics for an arbitrary combination device when introducing into its structure stuck-at faults at the outputs of internal elements is described. The analyzed structures make it possible to build fault-tolerant digital devices with reduced structural redundancy compared to widely applied approach based on the use of triple modular redundancy with majority correction.

It was shown that the corrective ability of fault-tolerant structures is determined by the properties of the parity code chosen for calculations checking. The features of error detection of each structure under the action of stuck-at faults in their blocks have been established. They can be used in practice when implementing computing devices and systems on a modern programmable element base.

Keywords: fault-tolerant devices, self-dual devices, error correction, calculations checking by parity code, self-dual testing

For citation: Efanov D. V., Pogodina T. S. Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code. II. Modeling the operation of digital devices in case of faults. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 838–853. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-838-853>. – EDN: FKEAPG.

Введение. Для построения высоконадежных и безопасных систем управления используются разнообразные подходы, в число которых входит контроль вычислений в блоках и узлах по различным диагностическим признакам [1, 2]. Среди таких признаков выделяются, например, следующие виды контроля: по заранее выбранному модулю; по принадлежности формируемых кодовых векторов множеству кодовых слов заранее выбранного избыточного кода; по принадлежности вычисляемых функций заданному классу булевых функций и др. [3–8].

Настоящая работа является продолжением работы [9], в которой описано пять отказоустойчивых структур, функционирующих в импульсном режиме и использующих контроль вычислений по признаку самодвойственности. При этом для контроля вычислений предварительно осуществлены сжатие сигналов, формируемых на выходах контролируемого устройства, с применением кода паритета, а затем преобразование полученного единственного сигнала в самодвойственный по методу логической коррекции сигналов (ЛКС). Фактически реализован контроль вычислений по методу самодвойственного паритета [10]. Две структуры из пяти основаны на использовании дублирования с контролем вычислений основного устройства (структура № 1) и дополнительного (структура № 2) (см. рис. 1 [9]). Другие две структуры реализованы на основе использования блока фиксации искаженных сигналов, строящегося с использованием метода ЛКС: в структуре № 3 контролируются вычисления на выходах основного блока, в структуре № 4 – вычисления на выходах контрольного устройства в блоке фиксации искаженных сигналов (см. рис. 2 [9]). Структура № 5 (см. рис. 3 [9]) представляет собой обобщенную самодвойственную отказоустойчивую структуру на основе метода ЛКС с контролем вычислений по паритету блоками дополнения и формирования функций коррекции.

Цель настоящей работы – исследование самодвойственных отказоустойчивых структур с контролем вычислений по паритету. В эксперименте с комбинационными цифровыми устройствами анализируются свойства каждой из них (за исключением обобщенной структуры, которая имеет схожие со структурой № 4 свойства).

Реализация отказоустойчивых устройств в Multisim. В ходе исследований рассматриваемых отказоустойчивых структур проведено моделирование с применением программного средства Multisim, цель которого – проверка их корректирующих свойств и установление особенностей их реализации. В качестве примера для моделирования отказоустойчивых структур использовано произвольное комбинационное уст-

ройство, схема которого изображена на рис. 1. Устройство имеет четыре входа и пять выходов. Его структура такова, что от некоторых функциональных элементов пути ведут сразу к нескольким его выходам (не рассмотрены элементы НЕ входного каскада, так как они в Multisim приведены при реализации схемы устройства только для получения инвертированных сигналов). В качестве модели неисправности рассмотрена модель одиночной константной неисправности выходов внутренних элементов (stuck-at fault) [11].

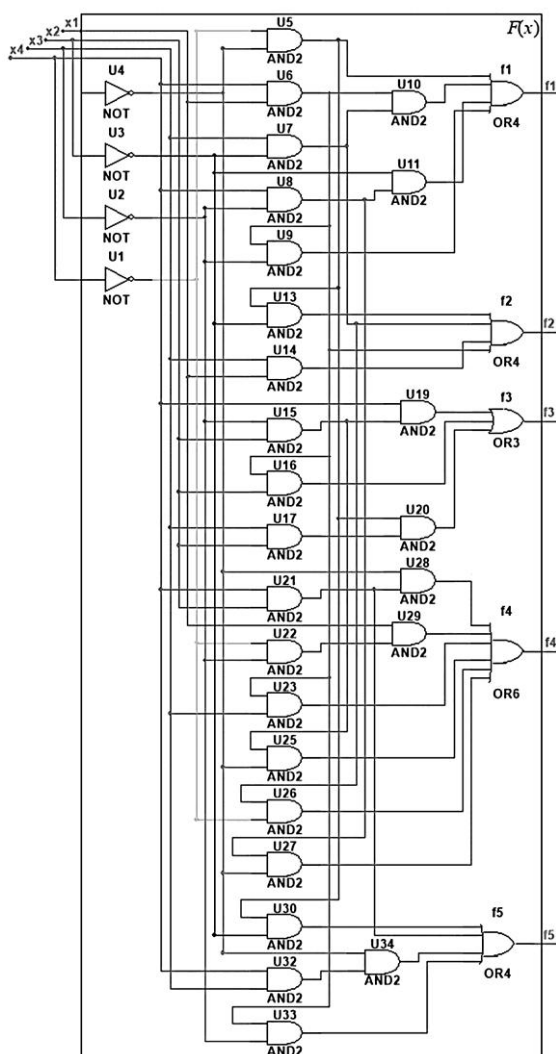


Рис. 1. Схема исходного устройства
Fig. 1. Circuit of the source device

Одиночные константные неисправности всех элементов (исключая из рассмотрения элементы U1–U4) приводят к возникновению ошибок на выходах устройства с различной кратностью. Однократные ошибки схемой встроенного контроля (СВК) по паритету обнаруживаются всегда. Необнаруженными могут оказаться ошибки с четной кратностью. Такие ошибки могут возникать в рассматриваемом устройстве только при действии неисправностей тех логических элементов, которые связаны путями с двумя и более выходами устройства. Таких элементов в структуре рассматриваемого устройства четыре – U5, U6, U7 и U8.



Рис. 2. Схема встроенного контроля для структур № 1–3
 Fig. 2. Concurrent error-detection circuit for structures No. 1–3

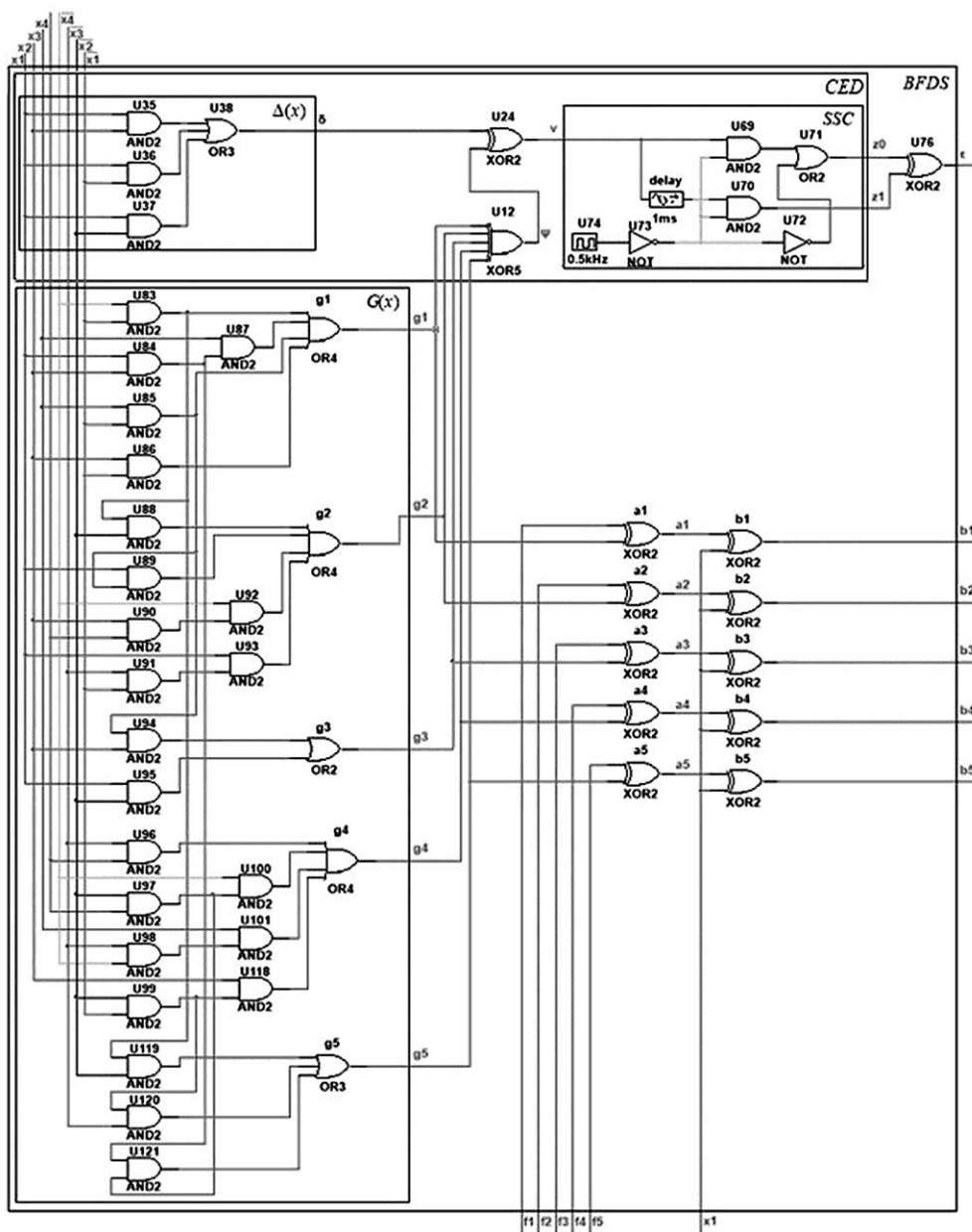


Рис. 3. Блок фиксации искаженных сигналов для структуры № 4
 Fig. 3. Block for fixing distorted signals for structure No. 4

Синтезируем структуры № 1–4 и исследуем особенности коррекции ошибок в них. При этом структуры, основанные на использовании метода ЛКС, будем синтезировать в условиях вырожденного блока $R(x)$, а функции коррекции определим как $r_i = x_i, i = \overline{1,5}$. Таким образом, при синтезе блоков фиксации искаженных сигналов структуры блоков $G(x)$ будут однозначно описываться выражением $g_i = f_i \oplus r_i = f_i \oplus x_i, i = \overline{1,5}$.

В структурах на основе дублирования (структуры № 1 и 2) важен вопрос синтеза СВК, так как все остальные элементы в них типовые (рис. 2). В структуре № 3, основанной на использовании метода ЛКС, СВК точно такая же, как и в структурах на основе дублирования. Отличие от структур на основе дублирования состоит в использовании блока фиксации искаженных сигналов, в котором будем рассматривать схему блока $G(x)$. Так как при синтезе обеих структур на основе использования метода ЛКС функции коррекции определены как $r_i = x_i, i = \overline{1,5}$, структуры блоков $G(x)$ в них одинаковые. Отличием блока фиксации искаженных сигналов является только наличие СВК для блока $G(x)$. Блок фиксации искаженных сигналов для структуры № 4 представлен на рис. 3.

Блоки $\Delta(x)$ во всех структурах имеют простую реализацию. За счет этого в большей степени достигается выигрыш в показателях сложности реализации отказоустойчивых устройств по сравнению с применением троирования с мажоритарной коррекцией сигналов. На рис. 2 также показана схема тестера самодвойственности SSC, принцип функционирования которого и особенности настройки генератора U31 и линии задержки A1 детально описаны в работах [12, 13].

Моделирование одиночных константных неисправностей. В ходе исследований, реализованных по разработанным структурам отказоустойчивых устройств, проведено моделирование одиночных константных неисправностей на выходах элементов U5, U6, U7 и U8 исходного устройства. Приведем в качестве примера описание работы структуры № 3 (рис. 4).

Отметим, что сигналы в данных структурах представляются в импульсном режиме. Таким образом, сигнал 0 кодируется последовательностью импульсов 0101...01, а сигнал 1 – последовательностью импульсов 1010...10. На входы системы входные комбинации подаются парами – комбинация и инвертированная во всех переменных комбинация (подаются рабочая и контрольная комбинации). Подаваемые пары рабочих комбинаций на всех последующих диаграммах отделены друг от друга пунктирными линиями. Рассмотрим работу структуры при возникновении неисправности типа «константа 1» на выходе элемента U5, сравнивая ее с работой в отсутствие неисправностей.

При подаче на входы первой пары комбинаций (0000, 1111) на первой комбинации ошибка, вызванная рассматриваемой неисправностью, не проявляет себя. На второй комбинации из пары вызывается искажение функции f_3 , что фиксируется СВК, на выходе которой устанавливается сигнал $\varepsilon = 0$, а после инвертирования – сигнал $\varepsilon_{inv} = 1$. Это одно из условий активации коррекции. Отметим, что функции a_i равны 1 на данном входном наборе, кроме $a_1 = 0$. В свою очередь, все b_i , кроме $b_1 = 1$, равны 0. Это второе условие активации коррекции. Функции f_i на выходах блока коррекции сигналов, как видно из сравнения диаграмм на рис. 4, имеют корректные значения. На каждой из пар комбинаций (0001, 1110) происходит ошибка, что не фиксируется схемой тестера. На третьей паре комбинаций (0010, 1101) при подаче первой комбинации неисправность не проявляется, а при подаче второй – проявляется в виде искажения значения выхода f_5 и корректируется, так как зафиксирована СВК. На четвертой паре комбинаций

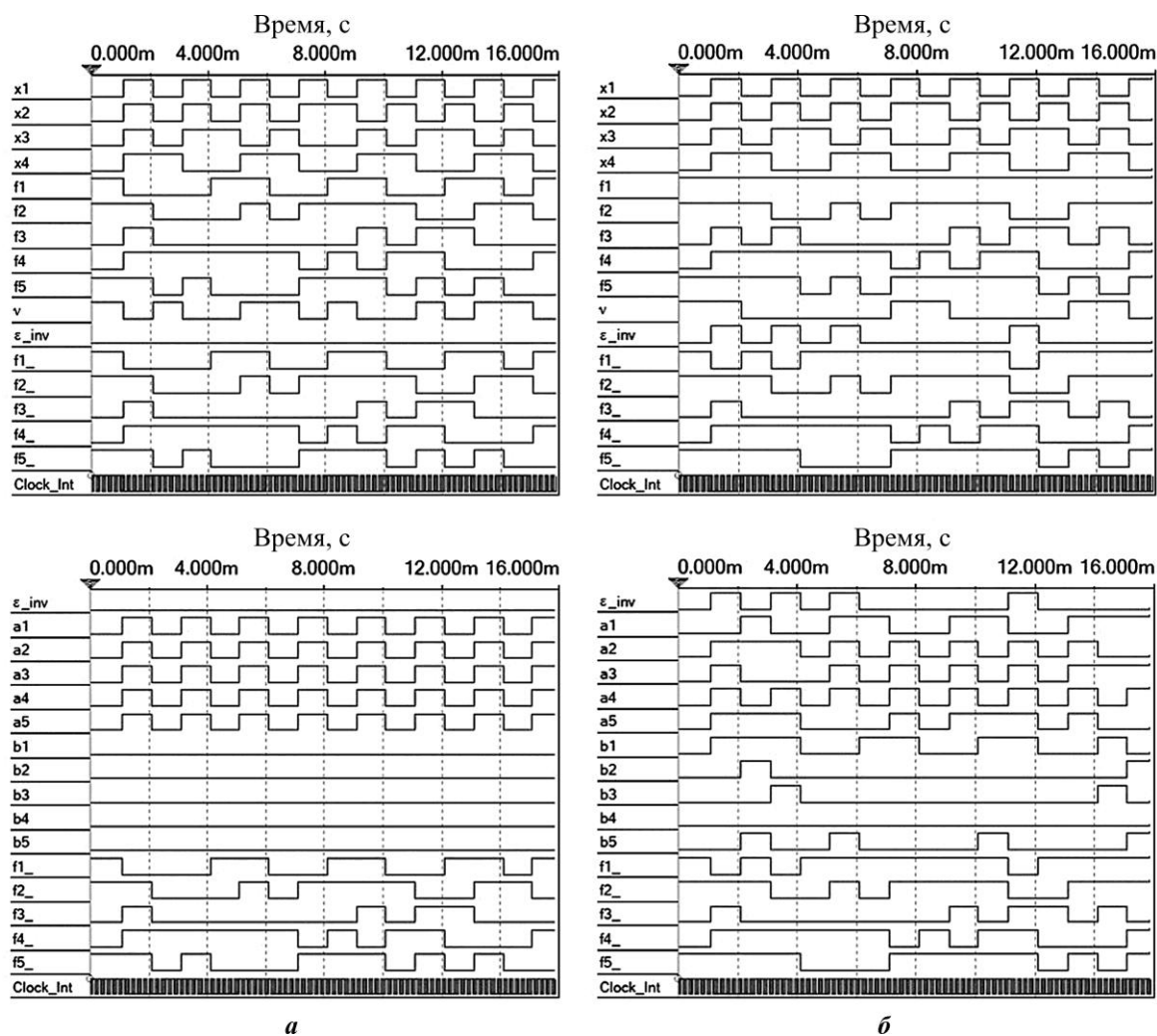


Рис. 4. Временные диаграммы работы отказоустойчивого устройства, реализованного по методу ЛКС с контролем вычислений основным блоком: *a* – в отсутствие неисправностей; *б* – при возникновении неисправности типа «константа 1» на выходе элемента U5

Fig. 4. Time diagrams of the operation of a fault-tolerant device implemented by the Boolean correction of signals method with calculations checking by a basic block: *a* – with no faults; *b* – in the event of a fault of the stuck-at-1 type at the output of the U5 gate

(0011, 1100) ошибки маскируются, так как одновременно возникают на обеих комбинациях из пары – на выходе f_1 . Тестер самодвойственности такую ошибку различить не способен. На пятой паре комбинаций (0100, 1011) и на седьмой (0110, 1001) неисправность не проявляется на выходах схемы. На шестой паре (0101, 1010) при подаче первой комбинации происходит искажение значений функций f_1 и f_5 , что СВК не фиксируется, поэтому выходные функции в блоке коррекции сигналов не корректируются. При подаче второй комбинации искажается только f_1 и коррекция происходит. При подаче комбинаций из восьмой пары (0111, 1000) на каждом из наборов происходит искажение сигналов на двух выходах, что не фиксируется СВК и не активирует коррекции. В итоге сразу на шести комбинациях из шестнадцати не произошла коррекция сигналов. Этот пример показывает недостатки рассматриваемого метода организации

контроля вычислений. Задача решается путем контроля групп выходов по кодам паритета [1, 8] либо иными способами кодирования [14, 15].

Особенностью самодвойственной СВК на основе схемы сжатия по паритету является следующее утверждение.

Утверждение 1. СВК не зафиксирует ошибку на выходах контролируемого устройства в следующих случаях: ошибка будет иметь четную кратность; ошибка проявится на обеих комбинациях, подаваемых парой.

Из данного утверждения вытекает следующее утверждение.

Утверждение 2. При одиночных неисправностях в устройствах самодвойственной отказоустойчивой структуры, реализованной по методу ЛКС с контролем вычислений по паритету основным блоком, коррекции неверных сигналов не произойдет, если СВК не зафиксирует ошибку.

По-другому работает структура, основанная на использовании метода ЛКС с контролем вычислений в блоке фиксации искаженных сигналов (структура № 4). На рис. 5 приведены временные диаграммы ее работы при неисправности типа «константа 1» на выходе элемента U5.

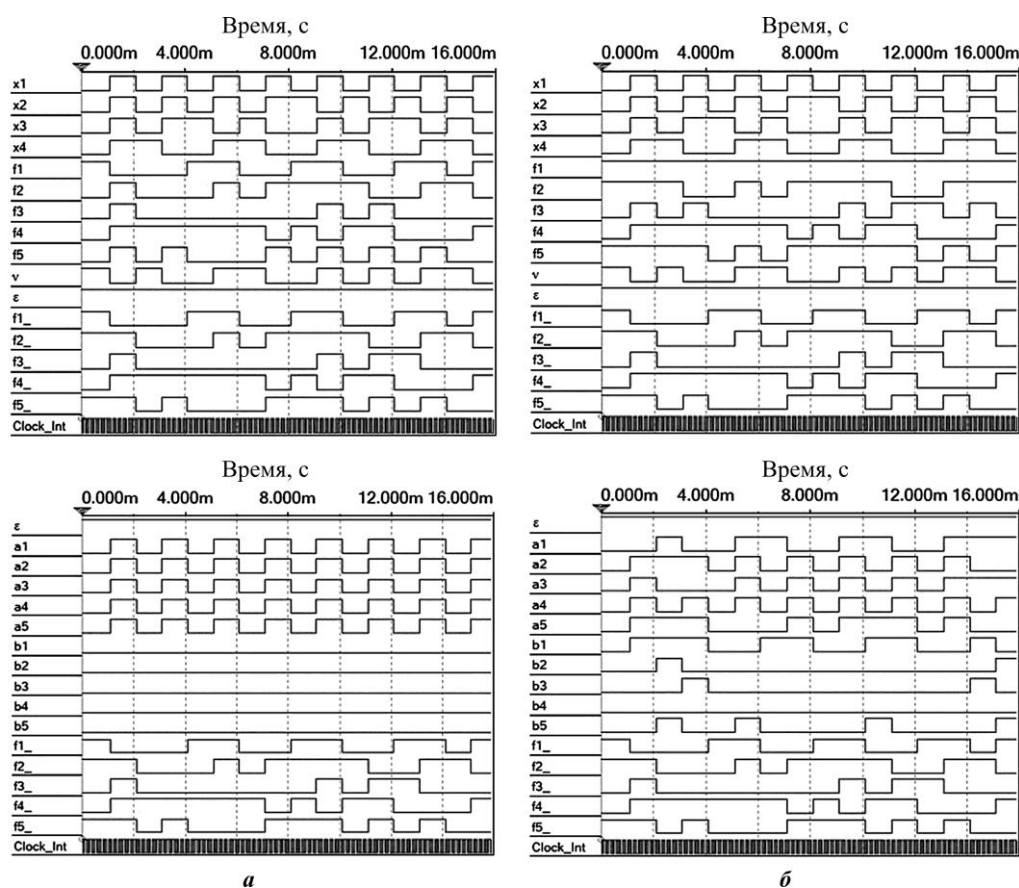


Рис. 5. Временные диаграммы работы отказоустойчивого устройства, реализованного по методу ЛКС с контролем вычислений в блоке фиксации искаженных сигналов: *a* – в отсутствие неисправностей; *б* – при возникновении неисправности типа «константа 1» на выходе элемента U5 блока $F(x)$

Fig. 5. Time diagrams of the operation of a fault-tolerant device implemented by the Boolean correction of signals method with calculations checking in the block for fixing distorted signals: *a* – with no faults; *b* – in the event of a fault of the stuck-at-1 type at the output of the U5 gate of the block $F(x)$

Коррекция ошибок, вызванных неисправностями в блоке $F(x)$ в данной структуре, происходит всегда, поскольку СВК контролирует вычисления в блоке $G(x)$, который в силу принятой модели одиночных неисправностей работает корректно, и на выходе СВК всегда присутствует сигнал логической единицы. Сигналы на выходах f_i и g_i с одинаковыми индексами сравниваются на элементах a_i и корректируются путем активации сигналов на выходах элементов b_i и работы блока коррекции сигналов.

Утверждение 3. При одиночных неисправностях в устройствах самодвойственной отказоустойчивой структуры, реализованной по методу ЛКС с контролем вычислений по паритету в блоке фиксации искаженных сигналов, коррекция ошибок на выходах основного блока происходит всегда.

Показатели обнаружения неисправностей в устройствах $F(x)$ приведены в табл. 1 и 2, где $n_C^D, n_P^D, n_C^U, n_P^U$ – соответственно число комбинаций и их пар, на которых обнаружены неисправности, и число комбинаций и их пар, на которых неисправности не обнаружены; $\phi_C^D, \phi_P^D, \phi_C^U, \phi_P^U$ – доли числа комбинаций и их пар, на которых обнаружены ошибки от общего числа комбинаций и их пар, и доли числа комбинаций и их пар, на которых не обнаружены ошибки от общего числа комбинаций и их пар. Всего комбинаций 128, а их пар 64.

Таблица 1
Показатели обнаружения неисправностей в тестируемой схеме поэлементно
Table 1

Indicators of fault detection in the tested circuit gate by gate

Элемент	Неисправность	Число комбинаций, на которых обнаружена неисправность	Число пар комбинаций, на которых обнаружена неисправность	Число комбинаций, на которых не обнаружена неисправность	Число пар комбинаций, на которых не обнаружена неисправность
Самодвойственная отказоустойчивая структура на основе дублирования с контролем вычислений по паритету основным блоком					
U5	Константа 0	0	2	4	2
	Константа 1	4	4	6	2
U6	Константа 0	0	0	4	4
	Константа 1	2	3	8	3
U7	Константа 0	2	4	2	0
	Константа 1	1	3	9	4
U8	Константа 0	0	0	1	1
	Константа 1	0	4	5	1

Окончание

Элемент	Неисправность	Число комбинаций, на которых обнаружена неисправность	Число пар комбинаций, на которых обнаружена неисправность	Число комбинаций, на которых не обнаружена неисправность	Число пар комбинаций, на которых не обнаружена неисправность
Самодвойственная отказоустойчивая структура на основе дублирования с контролем вычислений по паритету дополнительным блоком					
U5	Константа 0	4	4	0	0
	Константа 1	10	6	0	0
U6	Константа 0	4	4	0	0
	Константа 1	10	6	0	0
U7	Константа 0	4	4	0	0
	Константа 1	10	7	0	0
U8	Константа 0	1	1	0	0
	Константа 1	5	5	0	0
Самодвойственная отказоустойчивая структура, реализованная по методу ЛКС с контролем вычислений по паритету основным блоком					
U5	Константа 0	0	2	4	2
	Константа 1	4	4	6	2
U6	Константа 0	0	0	4	4
	Константа 1	2	3	8	3
U7	Константа 0	2	4	2	0
	Константа 1	1	3	9	4
U8	Константа 0	0	0	1	1
	Константа 1	0	4	5	1
Самодвойственная отказоустойчивая структура, реализованная по методу ЛКС с контролем вычислений по паритету блоком дополнения					
U5	Константа 0	4	4	0	0
	Константа 1	10	6	0	0
U6	Константа 0	4	4	0	0
	Константа 1	10	6	0	0
U7	Константа 0	4	4	0	0
	Константа 1	10	7	0	0
U8	Константа 0	1	1	0	0
	Константа 1	5	5	0	0

Таблица 2

Показатели обнаружения неисправностей в тестируемой схеме в общем

Table 2

Indicators of fault detection in the tested circuit in general

Отказоустойчивая структура	n_C^D	n_P^D	n_C^U	n_P^U	$\phi_C^D, \%$	$\phi_P^D, \%$	$\phi_C^U, \%$	$\phi_P^U, \%$
№ 1	9	20	39	17	7,031	31,25	30,469	26,563
№ 2	48	37	0	0	37,5	57,813	0	0
№ 3	9	20	39	17	7,031	31,25	30,469	26,563
№ 4	48	37	0	0	37,5	57,813	0	0

Из анализа таблиц следует, что во всех структурах, кроме последней, имеет место некоторая доля необнаруженных ошибок, что не дает возможности их коррекции в блоке коррекции сигналов. В структуре № 4 обнаруженными оказались все ошибки, так как СВК контролирует в ней вычисления на выходах блока $G(x)$. Это может привести к ложной коррекции, так как значение сигнала $\varepsilon = 1$ и условием активации коррекции будет являться возникновение логической единицы на выходе каких-либо элементов b_i , $i = \overline{1, m}$.

Исследуем влияние неисправностей блока $G(x)$ в структурах, реализованных по методу ЛКС (структуры № 3 и 4), на возможное появление ложной коррекции сигналов, при которой изменяются верные значения функций в блоке коррекции сигналов. Отметим, что в структуре № 3 контролируются вычисления на выходах исходного устройства, а в структуре № 4 – на выходах блока $G(x)$.

Моделирование неисправностей на выходах элементов U83, U85, U97 и U99, связанных путями с двумя и более выходами устройства $G(x)$, в структуре № 3 показало, что неисправности данных элементов не влияют на работу схемы коррекции. Это подтверждает теоретические данные: на выходах элементов a_i при несовпадении входных сигналов вырабатывается единичный сигнал, он транслируется и на выходы b_i (при этом на выходе СВК значение сигнала $\varepsilon = 1$), далее в блоке коррекции сигналов он инвертируется, что исключает коррекцию сигналов.

Утверждение 4. При одиночных неисправностях в устройствах самодвойственной отказоустойчивой структуры, реализованной по методу ЛКС с контролем вычислений по паритету в основном блоке, коррекция ошибок на выходах основного блока происходит всегда.

Ошибки на выходах устройства $G(x)$ в структуре № 4, поскольку СВК установлена для контроля именно этого устройства, могут быть не обнаружены и могут привести к ложной коррекции сигналов. На рис. 6 для примера приведены временные диаграммы работы структуры при возникновении неисправности типа «константа 0» на выходе элемента U83.

Из анализа временных диаграмм следует, что на первой комбинации из пары (0000, 1111) и на первой комбинации из пары (0100, 1011) происходит ложная коррекция сигналов. На комбинации <0000> ошибка типа «константа 0» на выходе элемента U83 вызывает искажения функций g_1 и g_2 , что в СВК не фиксируется (см. рис. 6, сигнал ε на нижних диаграммах). Однако неверные значения искажения функций g_1 и g_2 поступают на входы элементов сравнения и вызывают на них единичные сигналы (сигналы на a_1 и a_2), а это, в свою очередь, приводит к возникновению единичных сигналов на выходах элементов b_1 и b_2 . Поскольку СВК ошибку не зафиксировала, на вторых входах элементов AND в блоке коррекции сигналов появляется единица. На вторых входах первого и второго элементов AND , связанных с элементами b_1 и b_2 , также присутствует сигнал логической единицы. Это и служит условием активации коррекции: значения функций f_1 и f_2 корректируются ложно. Аналогичная работа наблюдается и на комбинации <0100>.

В табл. 3 приведены все случаи ложной коррекции сигналов при неисправностях блока $G(x)$ в структуре № 4. Знаком «×» обозначены те комбинации, на которых происходит ложная коррекция значений рабочих функций при соответствующей неисправности в блоке $G(x)$. Пустые клетки соответствуют комбинациям, на которых ошибка не проявляется либо осуществляется верная коррекция значений вычисленных контролируемым устройством функций. Всего происходит 33 случая неверного исправления сигналов в структуре.

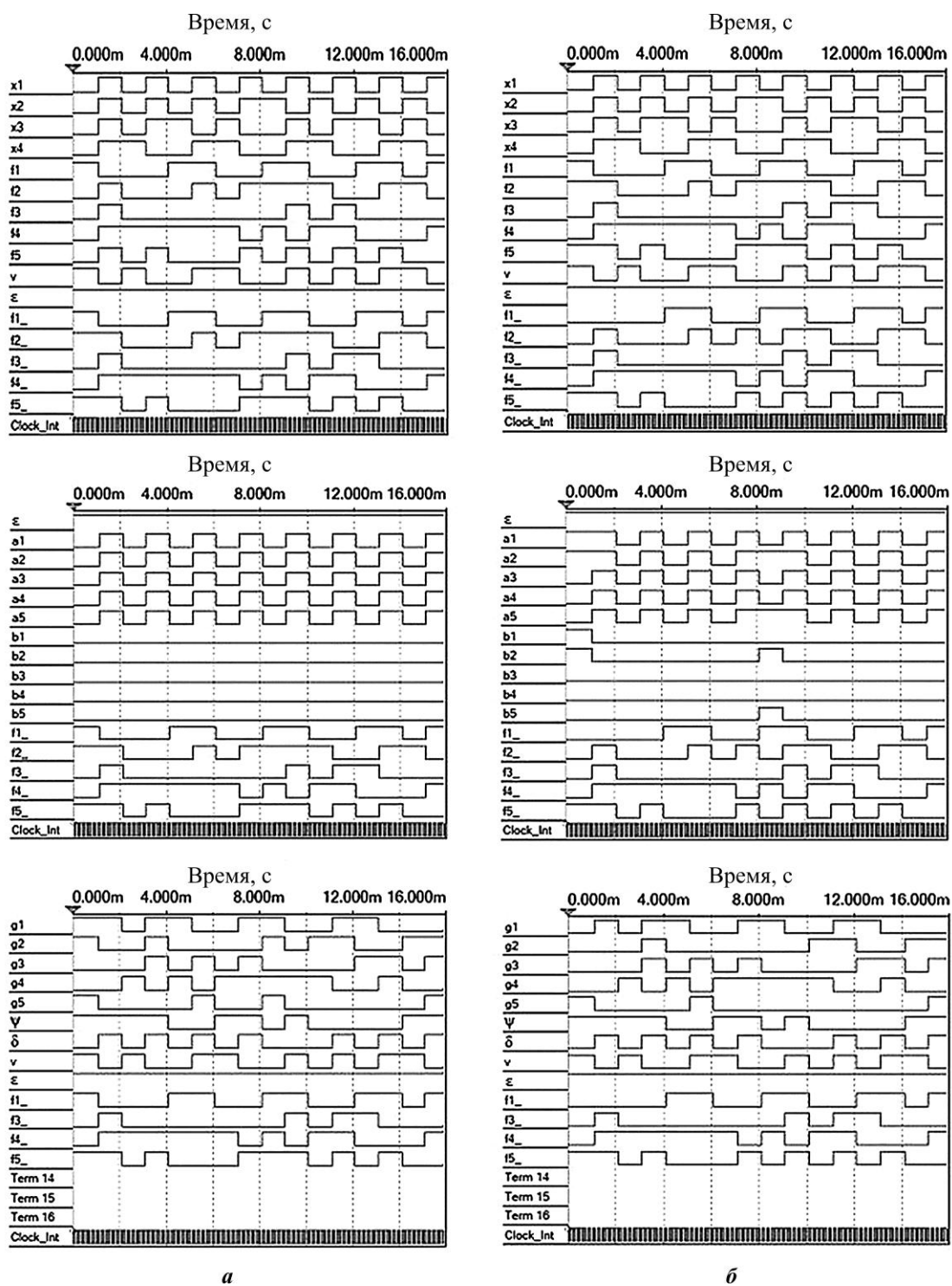


Рис. 6. Временные диаграммы работы отказоустойчивого устройства, реализованного по методу ЛКС с контролем вычислений в блоке фиксации искаженных сигналов: *a* – в отсутствие неисправностей; *б* – при возникновении неисправности типа «константа 0» на выходе элемента U83 блока $G(x)$

Fig. 6. Time diagrams of the operation of a fault-tolerant device implemented by the Boolean correction of signals method with calculations checking in the block for fixing distorted signals: *a* – with no faults; *b* – in the event of a fault of the stuck-at-0 type at the output of the U83 gate of the block $G(x)$

Таблица 3

Случаи ложной коррекции сигналов при неисправностях блока $G(x)$

Table 3

Cases of false signal correction in faults of block $G(x)$

Номер пары	Комбинация		U83		U85		U97		U99	
			Тип неисправности							
	Десятичный номер	Значения сигналов	0	1	0	1	0	1	0	1
1	0	0000	×					×		
	15	1111				×		×		
2	1	0001		×		×				×
	14	1110			×					×
3	2	0010								×
	13	1101		×		×				×
4	3	0011		×		×				×
	12	1100				×				
5	4	0100	×			×			×	
	11	1011								
6	5	0101		×		×	×			
	10	1010								
7	6	0110			×			×		×
	9	1001				×				×
8	7	0111		×		×		×		×
	8	1000		×						

Утверждение 5. При одиночных неисправностях в устройствах самодвойственной отказоустойчивой структуры, реализованной по методу ЛКС с контролем вычислений по паритету в блоке фиксации искаженных сигналов, ложная коррекция ошибок на выходах основного блока происходит в том случае, если СВК не фиксирует ошибку в блоке контрольной логики.

Данные особенности структуры № 4 необходимо учитывать при синтезе отказоустойчивых устройств.

Оценка показателей структурной избыточности. Проанализируем показатели избыточности синтезированных отказоустойчивых структур и сравним их с показателем избыточности структуры с тройной модульной избыточностью и мажоритарной коррекцией сигналов. В качестве метрики используем показатель числа входов функциональных элементов в структурах устройств.

Мажоритарная структура в выбранной метрике будет иметь следующий показатель сложности реализации (см. формулу (1) [9]):

$$L_{TMR} = 3L_{F(x)} + 5L_{MAJ} = 3L_{F(x)} + 5(3L_{2AND} + L_{3OR}) = 3 \cdot 73 + 5 \cdot (3 \cdot 2 + 3) = 264.$$

Рассчитаем сложность структур, основанных на дублировании. Они будут равными. При этом требуется уточнить показатель сложности реализации SSC. В выбранной метрике, согласно схеме SSC из [12, 13], показатель сложности $L_{SSC} = 9$. Сложность элементов сравнения $L_{XOR} = 2$, как это приведено на схемах, реализованных в Multisim. Сложность блоков $\Delta(x)$ оценивается показателем $L_{\Delta(x)}^{DMRN} = 4$. Отсюда получаем (см. формулу (2) [9])

$$\begin{aligned} L_{DMR}^N &= 2L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{DMRN} + L_{SSC} + (3 \cdot 5 + 1)L_{XOR} + 5L_{2AND} = \\ &= 2 \cdot 73 + 4 + 9 + 16 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 201. \end{aligned}$$

Рассчитаем сложность структур, основанных на использовании метода ЛКС. Для этого определим сложности блоков $\Delta(x)$: $L_{\Delta(x)}^{BC1} = 4$ и $L_{\Delta(x)}^{BC2} = 9$. Сложности реализации блоков $G(x)$ в обеих структурах оцениваются показателем $L_{G(x)}^{BCN} = 63$. Блоки $R(x)$ вырожденные, а значит $L_{R(x)}^{BCN} = 0$. Тогда имеем (см. формулу (5) [9])

$$\begin{aligned} L_{BC}^1 &= L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BC1} + L_{G(x)}^{BC1} + L_{R(x)}^{BC1} + L_{SSC} + (4 \cdot 5 + 1)L_{XOR} + 5L_{2AND} = \\ &= 73 + 4 + 63 + 0 + 9 + 21 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 201. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{BC}^2 &= L_{F(x)} + L_{\Delta(x)}^{BC2} + L_{G(x)}^{BC2} + L_{R(x)}^{BC2} + L_{SSC} + (4 \cdot 5 + 1)L_{XOR} + 5L_{2AND} = \\ &= 73 + 9 + 63 + 0 + 9 + 21 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 206. \end{aligned}$$

Таким образом, структуры № 1 и 2, основанные на использовании дублирования, а также структура № 3, реализованная методом ЛКС, оказались в данном примере менее сложными, чем структура, основанная на троировании с мажоритарной коррекцией сигналов. Показатель сложности их реализации составляет 76,136 % от показателя сложности реализации троированной структуры. Показатель сложности реализации структуры № 4 на основе метода ЛКС составляет 78,03 % от показателя сложности реализации троированной структуры. Можно отметить, что данные показатели соизмеримы, а улучшение по показателям структурной избыточности по сравнению с троированной структурой составило более 20 %.

Заключение. Моделирование самодвойственных отказоустойчивых структур дает возможность установить некоторые особенности, присущие каждой из них:

– использование в СВК устройства сжатия сигналов приводит к маскировке части ошибок. Во избежание этого требуется применение схемотехнических методов и/или других способов реализации схемы сжатия при использовании иных помехозащищенных кодов;

– применение структуры, основанной на методе ЛКС с контролем вычислений в блоке фиксации искаженных сигналов, позволяет корректировать любые ошибки на выходах исходного устройства, однако при условии безошибочности блока вычисления контрольных функций. Корректируются значения всех вычисленных исходным устройством функций одновременно в том случае, если сами ошибки зафиксированы в СВК;

– использование структуры, основанной на методе ЛКС с контролем вычислений в блоке фиксации искаженных сигналов, в случаях, когда СВК не фиксирует ошибку в блоке контрольной логики, допускает ложную коррекцию верных значений рабочих функций.

Таким образом, каждой из рассмотренных структур присуща та или иная особенность в коррекции ошибок. Для обеспечения полного покрытия неисправностей из заданных моделей требуется разработка методик применения того или иного способа помехозащищенного кодирования с учетом их специфики (обнаруживающих свойств и вносимой избыточности). Также эффективной может оказаться реализация СВК с контролем вычислений сразу по нескольким диагностическим признакам, например по принадлежности формируемых в СВК кодовых слов заранее выбранному коду и по принадлежности функций, описывающих проверочные символы, классу самодвойственных булевых функций [16].

Дальнейшие исследования в области синтеза самодвойственных отказоустойчивых цифровых устройств позволят установить критерии их использования при построении высоконадежных и безопасных систем управления.

Литература

1. **Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
2. **Ярмолик В. Н.** Контроль и диагностика вычислительных систем. Минск: Бестпринт, 2019. 387 с.
3. **Сагалович Ю. Л.** Кодовая защита оперативной памяти ЭВМ от ошибок // Автомат. и телемех. 1991. № 5. С. 3–45.
4. **Fujiwara E.** Code design for dependable systems: Theory and practical applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. 720 p.
5. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / **А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук и др.**; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. 614 с.
6. New self-dual circuits for error detection and testing / **A. Dmitriev, V. Saposhnikov, Vl. Saposhnikov et al.** // VLSI Design. 2000. Vol. 11. Iss. 1. Art. ID: 084720. <https://doi.org/10.1155/2000/84720>
7. **Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Гессель М.** Самодвойственные дискретные устройства. СПб.: Энергоатомиздат. С.-Петерб. отд-ние, 2001. 330 с.
8. **Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.** New methods of concurrent checking. 1st ed. Dordrecht: Springer, 2008. VIII, 182 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8420-1>
9. **Ефанов Д. В., Погодина Т. С.** Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. I. Структуры на основе дублирования и метода логической коррекции сигналов // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 5. С. 670–686. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-670-686>. – EDN: JSSLNH.
10. **Saposhnikov Vl. V., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V. V.** Self-dual parity checking – A new method for on-line testing // Proceedings of 14th VLSI Test Symposium. Princeton, NJ: IEEE, 1996. P. 162–168. <https://doi.org/10.1109/VTEST.1996.510852>
11. **Багхдади А. А. А., Хаханов В. И., Литвинова Е. И.** Методы анализа и диагностирования цифровых устройств (аналитический обзор) // АСУ и приборы автоматики. 2014. № 166. С. 59–74.
12. **Ефанов Д. В., Погодина Т. С.** Самодвойственный контроль комбинационных схем с применением кодов Хэмминга // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2022. № 3. С. 113–122. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2022-3-113-122>. – EDN: VCEWAT.
13. **Ефанов Д. В., Погодина Т. С.** Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 2. С. 349–392. <https://doi.org/10.15622/ia.22.2.5>. – EDN: FGQINF.
14. **Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.** Коды с суммированием для систем технического диагностирования: в 2 т. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. М.: Наука, 2020. 382 с.
15. **Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.** Коды с суммированием для систем технического диагностирования: в 2 т. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. М.: Наука, 2021. 453 с.
16. **Efanov D. V., Pivovarov D. V.** The hybrid structure of a self-dual built-in control circuit for combinational devices with pre-compression of signals and checking of calculations by two diagnostic parameters // 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Batumi: IEEE, 2021. P. 200–206. <https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9581019>

Статья поступила в редакцию 27.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.05.2023 г.; принята к публикации 24.10.2023 г.

Информация об авторах

Ефанов Дмитрий Викторович – доктор технических наук, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29), профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9), TrES-4b@yandex.ru

Погодина Татьяна Сергеевна – студентка Российского университета транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9), pogodina-ts@mail.ru

References

1. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Self-checking devices and fault-tolerant systems*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 208 p. (In Russian).
2. Yarmolik V. N. *Control and diagnostics of computer systems*. Minsk, Bestprint Publ., 2019. 387 p. (In Russian).
3. Sagalovich Yu. L. Error-correcting codes for computer memories. *Avtomat. i telemekh. = Autom. Remote Control*, 1991, no. 5, pp. 3–45. (In Russian).
4. Fujiwara E. *Code design for dependable systems: Theory and practical applications*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2006. 720 p.
5. Drozd A. V. (auth., ed.), Kharchenko V. S. (auth., ed.), Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A., Sulima Yu. Yu. *On-line testing of the safe instrumentation and control systems*. Kharkiv, National Aerospace Univ. n. a. N. E. Zhukovsky "KhAI", 2012. 614 p. (In Russian).
6. Dmitriev A., Saposhnikov V., Saposhnikov V. I., Goessel M., Moshanin V. I., Morosov A. New self-dual circuits for error detection and testing. *VLSI Design*, 2000, vol. 11, iss. 1, art. ID: 084720. <https://doi.org/10.1155/2000/84720>
7. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Goessel M. *Self-dual discrete devices*. St. Petersburg, Energoatomizdat. S.-Peterb. otd-nie Publ., 2001. 330 p. (In Russian).
8. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New methods of concurrent checking*. 1st ed. Dordrecht, Springer, 2008. viii, 182 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8420-1>
9. Efanov D. V., Pogodina T. S. Self-dual fault-tolerant structures with calculations checking by parity code. I. Structures based on duplication and the Boolean signals correction method. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 5, pp. 670–686. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-670-686>. – EDN: JSSLNH.
10. Saposhnikov V. I., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V. V. Self-dual parity checking – A new method for on-line testing. *Proceedings of 14th VLSI Test Symposium*. Princeton, NJ, IEEE, 1996, pp. 162–168. <https://doi.org/10.1109/VTEST.1996.510852>
11. Baghdadi A. A. A., Hahanov V. I., Litvinova E. I. Methods of analysis and diagnostics of digital devices (analytical review). *ASU i pribory avtomatiki = Management Information Systems and Devices*, 2014, no. 166, pp. 59–74. (In Russian).
12. Efanov D. V., Pogodina T. S. Self-dual control of combinational circuits with using Hamming codes. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2022, no. 3, pp. 113–122. (In Russian). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2022-3-113-122>. – EDN: VCEWAT.
13. Efanov D., Pogodina T. Properties investigation of self-dual combinational devices with calculation control based on Hamming codes. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2023, vol. 22, no. 2, pp. 349–392. (In Russian). <https://doi.org/10.15622/ia.22.2.5>. – EDN: FGQINF.
14. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Sum codes for technical diagnostics systems, in 2 vol., vol. 1: Classical Berger codes and their modifications*. Moscow, Nauka Publ., 2020. 382 p. (In Russian).
15. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Sum codes for technical diagnostics systems, in 2 vol., vol. 2: Weight-based sum codes*. Moscow, Nauka Publ., 2021. 453 p. (In Russian).
16. Efanov D. V., Pivovarov D. V. The hybrid structure of a self-dual built-in control circuit for combinational devices with pre-compression of signals and checking of calculations by two diagnostic parameters. *2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Batumi, IEEE, 2021, pp. 200–206. <https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9581019>

The article was submitted 27.03.2023; approved after reviewing 29.05.2023;
accepted for publication 24.10.2023.

Information about the authors

Dmitry V. Efanov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Higher School of Transport of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29), Prof. of the Automation, Remote Control and Communications on Railway Transport Department, Russian University of Transport (Russia, 127994, Moscow, Obraztsov st., 9, bld. 9), TrES-4b@yandex.ru

Tatiana S. Pogodina – Student of the Russian University of Transport (Russia, 127994, Moscow, Obraztsov st., 9, bld. 9), pogodina-ts@mail.ru

Тематический указатель статей, опубликованных в 2023 году

Фундаментальные исследования

Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Идентификация структуры наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций методами просвечивающей электронной микроскопии. Т. 28, № 6, с. 711–726.

Материалы электроники

Аишотов О. Г., Аишотова И. Б., Магкоев Т. Т. Резистивные свойства конструкционных стекол микроканальных пластин. Т. 28, № 6, с. 727–733.

Бабич А. В., Волощук И. А., Шерченков А. А., Переверзева С. Ю., Глебова Д. Д., Бабич Т. А. Термическая стабильность толстых пленок на основе низкотемпературных термоэлектрических материалов систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb, модифицированных добавками оксида меди. Т. 28, № 3, с. 281–286.

Горошко Д. Л., Гаврилин И. М., Дронов А. А., Горошко О. А., Волкова Л. С., Гревцов Н. Л., Чубенко Е. Б., Бондаренко В. П. Электрический транспорт в пористых структурах Si-Ge/c-Si, сформированных электрохимическим осаждением германия в пористый кремний. Т. 28, № 6, с. 734–744.

Громов Д. Г., Гаврилов С. А., Лебедев Е. А., Силибин М. В., Дубков С. В., Аникин А. В., Погалов А. И., Дронова Д. А., Бутманов Д. Д., Ширяев М. Е., Громов В. Д., Рязанов Р. М., Шарипов Р. А., Беспалов В. А. Управление составом тонких пленок Mo-Si-N-O при реактивном магнетронном распылении. Т. 28, № 6, с. 745–761.

Дмитриев В. К., Ильичёв Э. А., Кириленко Г. Г., Петрухин Г. Н., Рычков Г. С., Фролов В. Д. Характеристики и области возможных применений аморфных кремний-углеродных и металл-кремний-углеродных пленок. Обзор. Т. 28, № 1, с. 24–48.

Дронова Д. А., Дронов А. А. Исследование электрохимических свойств анода натрий-ионного аккумулятора на основе нанотрубчатого анодного TiO₂. Т. 28, № 1, с. 17–23.

Лавров И. В. Методы вычисления эффективных электрофизических свойств неоднородных сред с учетом многообразных структурных особенностей. Обзор. Т. 28, № 4, с. 403–430.

Морозова Е. В., Тимкаева Д. А. Нанотрубки на основе 2D-материалов SMoSiN₂ типа Янус для применений в наноэлектронике. Т. 28, № 3, с. 271–280.

Силаков Г. О., Лазоркина Е. Н., Гаврилов С. А., Воловликова О. В., Железнякова А. В., Дудин А. А. Исследование реакционной способности структуры por-Si/Pd по отношению к парам этанола. Т. 28, № 1, с. 7–16.

Тарасов А. М., Дубков С. В., Ву Ван Зунг, Киселев Д. А., Сиротина А. П., Волкова Л. С., Рязанов Р. М., Громов Д. Г. Исследование структурных и электрофизических свойств нанонитей титаната бария, полученных методом гидротермального синтеза. Т. 28, № 2, с. 151–163.

Технологические процессы и маршруты

Gromov D. G., Dubkov S. V., Savitskiy A. I., Gavrilov S. A. Features of the nanoparticles and binary nanoalloys formation during thermal evaporation and condensation on an inert surface in vacuum (Громов Д. Г., Дубков С. В., Савицкий А. И., Гаврилов С. А. Особенности формирования наночастиц и бинарных наносплавов при термическом испарении и конденсации на инертной поверхности в вакууме). Т. 28, № 1, с. 49–58.

Алексеев А. В., Переверзева С. Ю., Рязанов Р. М., Громов Д. Г. Особенности получения композитного электродного материала суперконденсатора УНТ/RuO₂·xH₂O методом электрофоретического соосаждения. Т. 28, № 1, с. 59–78.

Голишников А. А., Дюжев Н. А., Парамонов В. В., Потапенко И. В., Путря М. Г., Сомов Н. М., Чаплыгин Ю. А. Исследование и разработка процесса глубокого анизотропного травления кремния со сниженной шероховатостью боковых стенок структур. Т. 28, № 6, с. 762–772.

Касумов Ю. Н., Пухаева Н. Е., Мовчан С. А., Гончаров И. Н., Урумов В. В. Разработка и исследование перфорированных структур для газовых электронных умножителей на базе фольгированных полиимидных пленок. Т. 28, № 3, с. 326–336.

Корчагин Е. П., Нагрешников Е. В., Штерн М. Ю., Рогачев М. С., Мустафоев Б. Р., Штерн Ю. И. Исследования факторов, влияющих на сопротивление контактов в термоэлементах. Т. 28, № 6, с. 773–783.

Нелюбин И. В., Путря М. Г. Особенности контроля трехмерного профиля элементов и структур наноразмерных ИС. Обзор. Т. 28, № 3, с. 298–325.

Новак А. В., Соколов А. М., Румянцев А. В., Новак В. Р. Исследование зависимости формы кремниевых игл от концентрации раствора КОН при жидкостном анизотропном травлении. Т. 28, № 3, с. 287–297.

Подорожний О. В., Румянцев А. В., Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Моделирование процессов распыления материала и имплантации галлия при воздействии фокусированного ионного пучка на кремниевую подложку. Т. 28, № 5, с. 555–568.

Тимаков А. В., Горноста́й-Польский В. С., Шевяков В. И. Многоуровневая металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе вольфрама. Физика и технология. Обзор. Т. 28, № 2, с. 164–179.

Элементы интегральной электроники

Белов Е. Н., Королёв М. А. Исследование влияния электрического переходного процесса на результаты измерения теплового сопротивления ИС косвенным методом на основе термочувствительного параметра. Т. 28, № 1, с. 79–87.

Дюжев Н. А., Евсиков И. Д. Вакуумная наноэлектроника на основе полупроводниковых автоэмиссионных структур: текущее состояние и перспективы развития. Обзор. Т. 28, № 5, с. 569–599.

Кириллова А. В., Королёв М. А. Исследование влияния плавающего кармана на характеристики КНИ КМОП-транзисторов. Т. 28, № 2, с. 180–188.

Московская Ю. М., Бойченко Д. В. Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве. I. Система и алгоритмы реализации для различных категорий изделий. Т. 28, № 2, с. 189–201.

Московская Ю. М., Бойченко Д. В. Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве. II. Выбор объектов испытаний и статистическая обработка результатов контроля. Т. 28, № 3, с. 337–350.

Сауров М. А. Оптимизация параметров преобразователя излучения на основе кремниевого $p-i-n$ -диода. Т. 28, № 4, с. 431–440.

Смирнов В. И., Гавриков А. А. Исследование теплоэлектрических свойств мощных MOSFET-транзисторов. Т. 28, № 5, с. 600–611.

Якунина Н. В., Некрасов Н. П., Неволин В. К., Бобринецкий И. И. Переключение проводимости в латеральных каналах на основе максенов $Ti_3C_2T_x$. Т. 28, № 1, с. 88–95.

Схемотехника и проектирование

Melikyan V. Sh., Ghukasyan S. A., Harutyunyan S. S., Voskanyan G. A., Asatryan N. A. A method for minimizing aging influence on rail-to-rail operational amplifier with thin oxide transistors (Меликян В. Ш., Гукасян С. А., Арутюнян С. С., Восканян Г. А., Асатрян Н. А. Метод минимизации влияния старения на rail-to-rail операционный усилитель с тонкими оксидными транзисторами). Т. 28, № 3, с. 351–359.

Melikyán V. Sh., Vardumyan A. V., Harutyunyan A. G., Asatryan N. A., Melikyán Sh. V., Karapetyan E. Y. System for automated IC design based on generative adversarial and artificial deep neural networks

(Меликян В. Ш., Вардумян А. В., Арутюнян А. Г., Асатрян Н. А., Меликян Ш. В., Карапетян Э. Е. Система автоматизированного проектирования ИС, основанная на генеративно-сопоставительной и искусственной глубокой нейронных сетях). Т. 28, № 5, с. 612–620.

Дворников О. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н., Чумаков В. Е. Входные каскады программируемых быстродействующих операционных усилителей на основе базового матричного кристалла МН2ХА031. Т. 28, № 5, с. 629–641.

Крупкина Т. Ю., Лосев В. В., Беневоленский С. Б., Хлыбов А. И., Родионов Д. В. Влияние потерь в соединениях при измерении коэффициента усиления и коэффициента шума на анализаторе спектра. Т. 28, № 6, с. 794–801.

Лагунович Н. Л. Двумерное моделирование эмиттерного $p-n^+$ -перехода кремниевого $n-p-n$ -транзистора в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Т. 28, № 5, с. 621–628.

Петросянец К. О., Силкин Д. С., Попов Д. А., Исмаил-Заде М. Р., Харитонов И. А., Переверзев Л. Е., Морозов А. А., Тургенев П. В. Особенности TCAD- и SPICE-моделирования удара заряженной частицы в 6Т-ячейку статической памяти, изготовленную по КМОП-технологии с проектными нормами 28 нм. Т. 28, № 6, с. 826–837.

Раков А. В., Шевцов И. В., Борин О. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В. Методика оценки S-параметров высокоскоростных путей передачи сигналов в корпусах микросхем. Т. 28, № 6, с. 802–813.

Раннев Н. Ю., Кондратенко С. В., Дубинский А. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В. Высокоскоростной перестраиваемый КМОП-усилитель-ограничитель для приемника сигнала оптической линии. Т. 28, № 6, с. 814–825.

Соболев В. А., Лосев В. В. Разработка RTL-модели генератора псевдослучайных чисел на основе регистров сдвига с нелинейной обратной связью в каскаде Голлмана. Т. 28, № 6, с. 784–793.

Солодовников А. П., Переверзев А. Л., Силантьев А. М. Программно-аппаратный комплекс для ускорения функциональной верификации систем на кристалле. Т. 28, № 4, с. 441–451.

Шариков А. И., Шарикова Е. М. Масштабируемая ПЛИС-система выборки и хранения данных для конвейерной обработки видеопотока. Т. 28, № 2, с. 202–211.

Шумарин С. В., Фролова Т. Н., Богачев А. М. Методика идентификации параметров Spice-моделей КМОП-микросхем по температурным зависимостям их динамических характеристик. Т. 28, № 2, с. 212–221.

Микро- и наносистемная техника

Баранов А. А., Грабов А. Б., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А. Двухосевой однокристалльный АМР-преобразователь магнитного поля. Т. 28, № 4, с. 500–508.

Беляков И. А., Вертянов Д. В., Кочергин М. Д., Тимошенко С. П. Особенности проектирования и технологии изготовления трехмерной микросистемы с торцевой коммутацией. Т. 28, № 4, с. 471–488.

Галкин А. А., Еркин П. В., Захаров В. П., Соломкина Н. А., Тимошенко А. С., Тимошенко С. П. Применение инерциальных МЭМС в системе автоматической отцепки десантируемого груза. Т. 28, № 4, с. 489–499.

Грабов А. Б., Рискин Д. Д., Суздальцев С. Ю., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А. Технология герметизации МЭМС на уровне пластины на базе SLID-структур, выращенных из электролитов на основе металлоорганических комплексов Cu-Sn. Т. 28, № 4, с. 461–470.

Карамышев В. П. Методики определения концентрации и подвижности в слоях областей пространственного заряда. Т. 28, № 2, с. 232–243.

Пайн Со Хту, Калугин В. В., Кочурина Е. С. Моделирование и оптимизация емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа. Т. 28, № 4, с. 452–460.

Пью Вин Тун, Симонов Б. М., Тимошенко С. П. Исследование возможностей повышения чувствительности МЭМС-датчика давления емкостного типа с мембранами различных геометрических форм. Т. 28, № 2, с. 222–231.

Тимошенко С. П., Тимошенко А. С., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Дернов И. С., Мусаткин А. С., Лебедев А. А. Исследование влияния степени вакуумирования на добротность колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика. Т. 28, № 5, с. 642–648.

Интегральные радиоэлектронные устройства

Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Исследование плоского угла зрения кремниевых фотоумножителей. Т. 28, № 3, с. 360–367.

Дворников О. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н., Галкин Я. Д., Куниц А. В., Чумаков В. Е. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле. Т. 28, № 1, с. 96–111.

Карачев Е. В., Благодатский Г. А., Смирнов С. В. Информационная система поддержки принятия решений по управлению режимами работы когнитивного радио. Т. 28, № 2, с. 244–251.

Колесников Е. Б. Управляемый фазовращатель гармонического сигнала. Т. 28, № 4, с. 509–517.

Курчанов А. Ф., Слюсарев С. Н., Овчинников С. Н., Сальников А. С. Миниатюрный стандарт частоты на основе КПП в Cs. Т. 28, № 5, с. 649–658.

Биомедицинская электроника

Жило Н. М. Управление удалением жидкости в системе автоматизированного перитонеального диализа. Т. 28, № 4, с. 518–528.

Информационно-коммуникационные технологии

Гагарина Л. Г., Букарев А. В. Метод автоматизированного тестирования устройств потребительской электроники с помощью удаленного вызова процедур и облачных сервисов. Т. 28, № 5, с. 687–699.

Ефанов Д. В., Зуева М. В. Коды с суммированием с сериями перестановок весов между информационными векторами для систем технического диагностирования. Т. 28, № 1, с. 112–128.

Ефанов Д. В., Погодина Т. С. Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. I. Структуры на основе дублирования и метода логической коррекции сигналов. Т. 28, № 5, с. 670–686.

Ефанов Д. В., Погодина Т. С. Самодвойственные отказоустойчивые структуры с контролем вычислений по паритету. II. Моделирование работы цифровых устройств при неисправностях. Т. 28, № 6, с. 838–853.

Кузнецова Е. С. Методика перехода к электронным конструкторским документам для автоматизации нормоконтроля. Т. 28, № 4, с. 529–536.

Макаров А. И., Мунерман В. И. Использование $(0, \mu)$ -свернутого произведения многомерных матриц для решения задач теории графов. Т. 28, № 5, с. 659–669.

Сотников А. В., Шипатов Е. А., Шипатов А. В. Алгоритм выделения объектов на изображениях на основе слияния суперпикселей. Т. 28, № 1, с. 129–139.

Чипчагов М. С., Кублик Е. И., Попов В. А. Алгоритм индексации объектов рекомендательной системы. Т. 28, № 2, с. 252–260.

Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Климочкина М. А., Попова Т. В. Метод формирования контента для тематических порталов на основе интеллектуального анализа данных. Т. 28, № 3, с. 368–377.

Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Конюхов Е. В., Харитонова А. Д. Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики. Т. 28, № 4, с. 537–546.

Щербов И. Л. Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений. Т. 28, № 3, с. 378–384.

Краткие сообщения

Смирнова В. П., Крупкина Т. Ю. Моделирование средствами TCAD воздействия тяжелых заряженных частиц на *n*-МОП-структуру в составе ячейки памяти. Т. 28, № 3, с. 385–390.

Юбилей

Беспалову Владимиру Александровичу – 65 лет. Т. 28, № 5, с. 700.

Королёву Михаилу Александровичу – 90 лет. Т. 28, № 2, с. 261–262.

Красникову Геннадию Яковлевичу – 65 лет. Т. 28, № 3, с. 391–392.

Селищеву Сергею Васильевичу – 70 лет. Т. 28, № 5, с. 701.

Сидоренко Анатолию Сергеевичу – 70 лет. Т. 28, № 5, с. 702.

Конференции

XXX Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2023» с международным участием. Т. 28, № 1, с. 142.

Вторая объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (13–16 ноября 2023 г., г. Черноголовка). Т. 28, № 5, 2-я стр. обложки.

Гагарина Л. Г. Об итогах III Научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях – 2022». Т. 28, № 1, с. 140–141.

Об итогах XXX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2023» с международным участием. Т. 28, № 3, с. 393–394.

Российский форум «Микроэлектроника 2023». Т. 28, № 4, 2-я стр. обложки.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 – 2022 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал «Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА» публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- фундаментальные исследования;
- материалы электроники;
- технологические процессы и маршруты;
- элементы интегральной электроники;
- схемотехника и проектирование;
- микро- и наносистемная техника;
- интегральные радиоэлектронные устройства;
- биомедицинская электроника;
- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемы высшего образования.

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом *в двух экземплярах*.

2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.

3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).

4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: <http://ivuz-e.ru/authors/>

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна быть структурирована и содержать: введение; основную часть; заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

– на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;

– на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать **ключевые слова** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

– печатается *через два интервала* с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

– абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только *по умолчанию*. Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, PDF, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

– оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

– нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

– русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык (для References).

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

– оформляется отдельным файлом;

– необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

– указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miec.ru

Сайт: <http://ivuz-e.ru>

