



ISSN 1561-5405 (print)

ISSN 2587-9960 (online)

DOI: 10.24151/1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 28

№ 3

май – июнь

Vol. 28

No. 3

May – June

2023

ПОДПИСКА 2023

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

Периодичность журнала – 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

<http://ivuz-e.ru>



Известия высших учебных заведений.
ЭЛЕКТРОНИКА

Том 28, № 3, 2023

май – июнь

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., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471

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

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

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

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

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

Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия), 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

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

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

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

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. Проскуракова

Верстка А. Ю. Рыжков, С. Ю. Рыжков

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

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

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

Подписано в печать 15.06.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 15,345 усл.печ.л., 13,344 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 23. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

1.3.5. Физическая электроника (технические науки, физико-математические науки)

1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки, физико-математические науки)

1.3.11. Физика полупроводников (технические науки, физико-математические науки)

1.3.12. Физика магнитных явлений (технические науки, физико-математические науки)

2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (технические науки, физико-математические науки)

2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки)

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки),

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

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

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934.

Подписной индекс в каталоге «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» – 47570.

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

- Морозова Е. В., Тимкаева Д. А.* Нанотрубки на основе 2D-материалов SMoSiN_2 типа Янус для применений в нанoeлектронике 271
- 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 281

Технологические процессы и маршруты

- Новак А. В., Соколов А. М., Румянцев А. В., Новак В. Р.* Исследование зависимости формы кремниевых игл от концентрации раствора KOH при жидкостном анизотропном травлении 287
- Нелюбин И. В., Путря М. Г.* Особенности контроля трехмерного профиля элементов и структур наноразмерных ИС. Обзор 298
- 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 326

Элементы интегральной электроники

- Московская Ю. М., Бойченко Д. В.* Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве. II. Выбор объектов испытаний и статистическая обработка результатов контроля 337

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) 351

Интегральные радиоэлектронные устройства

- Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В.* Исследование плоского угла зрения кремниевых фотоумножителей 360

Информационно-коммуникационные технологии

- Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Климочкина М. А., Попова Т. В.* Метод формирования контента для тематических порталов на основе интеллектуального анализа данных 368
- Щербов И. Л.* Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений 378

Краткие сообщения

- Смирнова В. П., Крупкина Т. Ю.* Моделирование средствами TCAD воздействия тяжелых заряженных частиц на n -МОП-структуру в составе ячейки памяти 385

Юбилей

- Красникову Геннадию Яковлевичу – 65 лет 391

Конференции

- Об итогах XXX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2023» с международным участием 393
- К сведению авторов 395



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 28, No. 3, 2023
May – June

The scientific and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), 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., JSC “NIIME” (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, **http://ivuz-e.ru**

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

Signed to print 15.06.2023. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed
sheets 15,345. Number of copies 130. Order no. 23. 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

Electronics materials

- Morozova E. V., Timkaeva D. A.* Nanotubes based on 2D Janus-type materials SMoSiN_2 for applications in nanoelectronics 271
- Babich A. V., Voloshchuk I. A., Sherchenkov A. A., Pereverzeva S. Yu., Glebova D. D., Babich T. A.* Thermal stability of thick films on the basis of Bi-Te-Se and Bi-Te-Sb low-temperature thermoelectric materials modified by copper oxide additives 281

Technological processes and routes

- Novak A. V., Sokolov A. M., Rumyantsev A. V., Novak V. R.* Investigation of the dependence of the silicon needles shape on the KOH solution concentration during wet anisotropic etching 287
- Nelyubin I. V., Putrya M. G.* Features of three-dimensional profile control of elements and structures of nanoscaled ICs. Review 298
- Kasumov Yu. N., Puhayeva N. E., Movchan S. A., Goncharov I. N., Urumov V. V.* Production and research of perforated structures for gas electronic multipliers based on foil-clad polyimide films 326

Integrated electronics elements

- Moskovskaya Yu. M., Boychenko D. V.* Prediction analysis of the microcircuits' radiation hardness within fabrication process. II. Test objects choice and the obtained results statistical processing 337

Circuit engineering and design

- 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 351

Integrated radioelectronic devices

- Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V.* Investigation of the flat viewing angle of silicon photomultipliers 360

Information-communication technologies

- Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Klimochkina M. A., Popova T. V.* Method of content formation for thematic portals based on data mining 368
- Shcherbov I. L.* Approbation of the algorithm for adaptive nonlinear optimal smoothing of multiple trajectory measurement data 378

Brief reports

- Smirnova V. P., Krupkina T. Yu.* TCAD simulation of a heavy charged particle impact on a n -MOS structure as a part of a memory cell 385

Anniversaries

- Krasnikov Gennady Yakovlevich is 65 years old 391

Conferences

- On Summation of 30th Russia-Wide Interuniversity Science and Technology Conference of Students, PhD Students and Young Scientists "Microelectronics and Computer Sciences – 2023" with International Participation 393
- Instructions for authors 395

Научная статья
УДК 539.23:535.343.9
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-3-271-280
EDN: YUDZPB

Нанотрубки на основе 2D-материалов $SMoSiN_2$ типа Янус для применений в нанoeлектронике

Е. В. Морозова, Д. А. Тимкаева

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

kat-valezhanina@yandex.ru

Аннотация. 2D-материалы $XMoSiN_2$ типа Янус ($X = S, Se$ или Te) характеризуются высокими значениями энергии связи и сильным встроенным электрическим полем, позволяющим разделять генерируемые электронно-дырочные пары в пределах одного слоя. Данные 2D-материалы перспективны для фотовольтаических приложений. В настоящей работе в рамках моделирования рассмотрены выращенные и оптимизированные нанотрубки малых диаметров на основе 2D-материалов $SMoSiN_2$ типа Янус. С помощью расчетов в рамках теории функционала плотности получены зонные структуры и спектры оптического поглощения таких нанотрубок с различным расположением халькогена. Для рассмотренных структур наблюдается широкая область поглощения коротковолнового излучения при деформации трубки $\varepsilon = 12,46\%$. Нанотрубки $XMoSiN_2$ типа Янус проявляют себя как полупроводники, электронными и оптическими свойствами которых можно управлять путем их деформации.

Ключевые слова: 2D-материалы $SMoSiN_2$, нанотрубки, зонная структура, спектры оптического поглощения

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

Для цитирования: Морозова Е. В., Тимкаева Д. А. Нанотрубки на основе 2D-материалов $SMoSiN_2$ типа Янус для применений в нанoeлектронике // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 271–280. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-271-280>. – EDN: YUDZPB.

Original article

Nanotubes based on 2D Janus-type materials SMoSiN_2 for applications in nanoelectronics

E. V. Morozova, D. A. Timkaeva

*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia
SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia*

kat-valezhanina@yandex.ru

Abstract. Two-dimensional (2D) Janus-type materials XMoSiN_2 ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ or Te) are characterized by high values of binding energy and strong built-in field allowing the separation of generated electron-hole pairs within a single layer. These 2D materials are promising for photovoltaic applications. In this work, nanotubes of small diameters based on 2D Janus-type materials SMoSiN_2 , constructed and optimized, are considered in the framework of modeling. Using density functional theory calculations, the band structures and optical absorption spectra of these nanotubes with different chalcogen arrangements have been obtained. For the considered structures, a wide region of absorption of short-wavelength radiation is observed under tube deformation $\varepsilon = 12.46\%$. XMoSiN_2 Janus-type nanotubes act as semiconductors, the electronic and optical properties of which can be controlled by tube deformation.

Keywords: 2D material SMoSiN_2 , nanotube, zone structure, optical absorption spectra

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

For citation: Morozova E. V., Timkaeva D. A. Nanotubes based on 2D Janus-type materials SMoSiN_2 for applications in nanoelectronics. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 271–280. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-271-280>. – EDN: YUDZPB.

Введение. Метод синтеза монослоя MoSi_2N_4 [1] позволяет получать стабильные 2D-материалы, для которых не существует природных слоистых 3D-кристаллов. Термодинамическая стабильность монослоев при нормальных условиях, высокая подвижность носителей заряда [1, 2] и ряд других преимуществ свидетельствуют о перспективности новых 2D-материалов из семейства MoSi_2N_4 для применений в нанoeлектронике.

В настоящей работе в рамках моделирования рассматривается возможность существования нанотрубок SMoSiN_2 типа Янус малого диаметра. С помощью расчетов в рамках теории функционала плотности (Density Functional Theory, DFT) исследуются зонные структуры и оптические свойства нанотрубок с различным расположением халькогена (на внутренней или внешней поверхности нанотрубки). Оценивается влияние продольной деформации на электронные свойства нанотрубок SMoSiN_2 типа Янус.

Методика исследования. Асимметричные структуры XMoSiN_2 типа Янус, построенные и оптимизированные из MoSi_2N_4 путем замены SiN_2 с одной стороны атомами халькогена (S, Se или Te), предложены и исследованы в работе [3] (рис. 1). Новая структура представляет собой гибрид 2D-дихалькогенида переходного металла и моно-

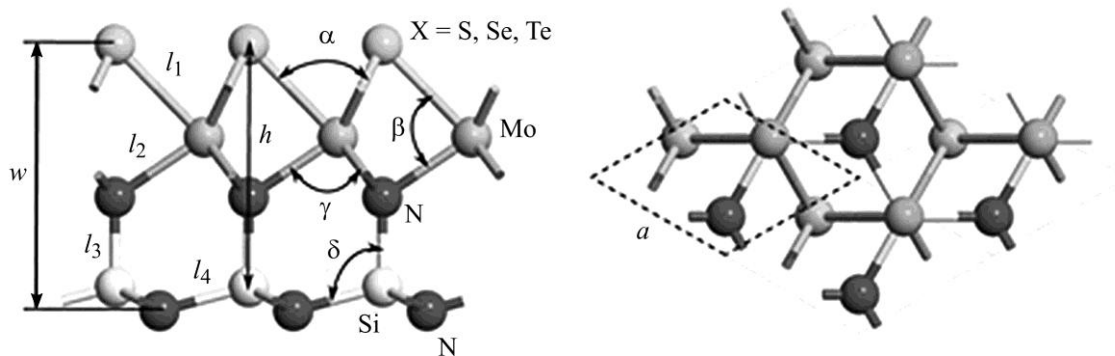


Рис. 1. Структура монослоя $XMoSiN_2$ (l – длина связи; h – расстояние между атомами халькогена и кремния; w – расстояние между атомами халькогена и натрия) [3]
 Fig. 1. The structure of the $XMoSiN_2$ monolayer (l – the bond length; h – the distance between chalcogen and silicon atoms; w – the distance between chalcogen and sodium atoms) [3]

слоя $MoSi_2N_4$. Монослои $XMoSiN_2$ характеризуются высокими значениями энергии связи (более 7,5 эВ/атом). Во всех исследованных монослоях присутствует сильное встроенное электрическое поле, позволяющее разделять генерируемые электронно-дырочные пары в пределах одного слоя, что перспективно для фотовольтаических приложений. Отсутствие горизонтальной плоскости отражения в сочетании со спин-орбитальным взаимодействием из-за значительного атомного веса переходного металла приводит к расщеплению зон за счет эффекта Рашбы. В табл. 1 приведены значения энергии запрещенной зоны E_g , полученные с помощью различных обменно-корреляционных функционалов, а также значения расщепления потолка валентной зоны Δ_V и дна зоны проводимости Δ_C из-за спин-орбитального взаимодействия.

Таблица 1

Значения энергии запрещенной зоны, расщепления потолка валентной зоны и дна зоны проводимости

Table 1

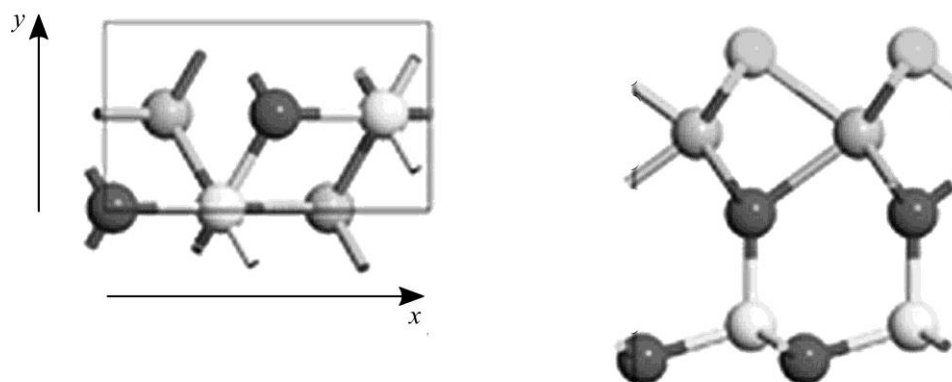
The values of the energy of the band gap, splitting of the ceiling of the valence band Δ_V and the bottom of the conduction band Δ_C

Монослой	E_g^{PBE} , эВ	E_g^{HSE06} , эВ	$E_g^{HSE06+SOC}$, эВ	Δ_V , мэВ	Δ_C , мэВ
$SMoSiN_2$	2,15	2,67	2,58	171	18
$SeMoSiN_2$	1,73	2,40	2,26	0	30
$TeMoSiN_2$	1,02	1,58	1,54	0	51

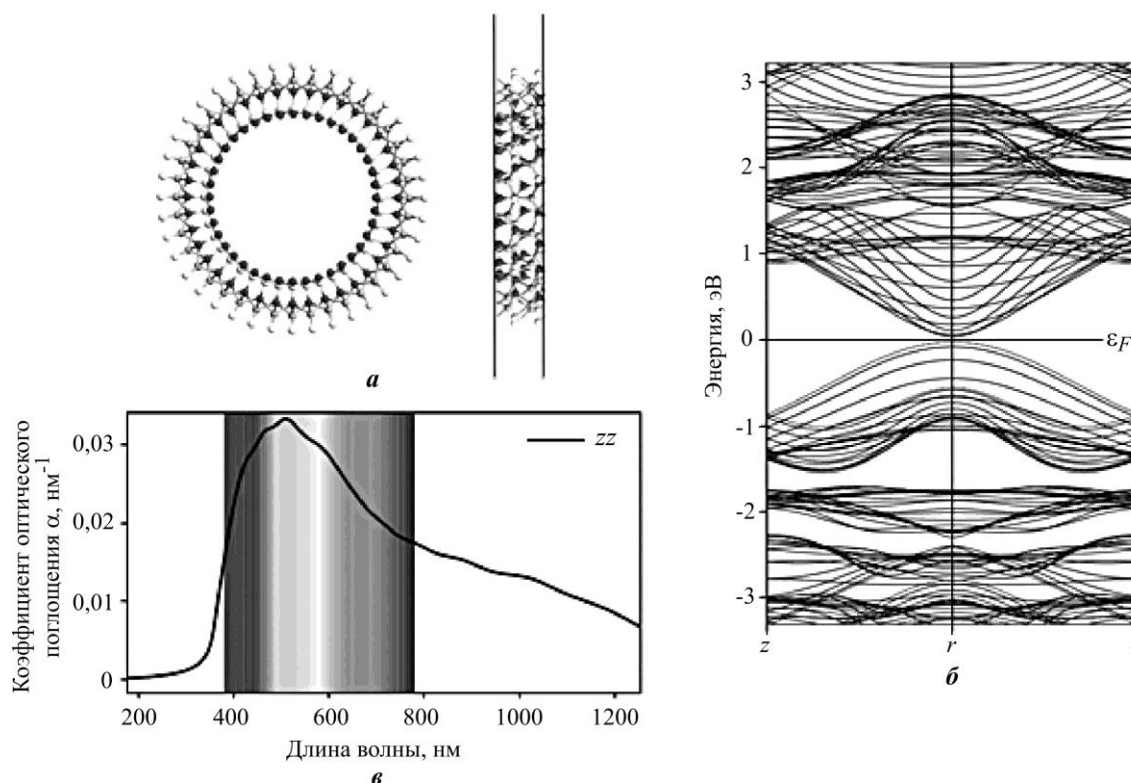
Примечание: PBE – обменно-корреляционный потенциал; HSE06 – гибридный обменно-корреляционный функционал; SOC – спин-орбитальное взаимодействие.

Представленные в настоящей работе результаты расчетов получены в рамках теории функционала плотности. В качестве программной среды использован пакет Quantum ATK [4]. Для исследуемых структур выбраны псевдопотенциал PseudoDojo [5] с линейной комбинацией базисных наборов атомных орбиталей (LCAO), обменно-корреляционный потенциал GGA-PBE [6]. Структуры оптимизировали до получения значения максимальной силы, действующей на каждый атом, менее 0,01 эВ/Å и значения максимального изменения энергии между двумя стадиями менее 10^{-5} эВ. Зонные структуры и оптические свойства рассчитаны с использованием гибридного обменно-корреляционного функционала HSE06. Сетку $1 \times 1 \times 15$ в первой зоне Бриллюэна использовали для оптимизации структуры и для расчета электронных и оптических свойств.

Результаты и их обсуждение. Исследуемые монослои потенциально могут быть свернуты в разные стороны, образуя нанотрубки различного типа. Рассмотрим несколько вариантов нанотрубок SMoSiN_2 типа Янус. Оптимизируем полученные структуры и оценим их свойства. Для построения нанотрубок выбрана суперъячейка, показанная на рис. 2. Для получения нанолента ячейка повторяется N_x или N_y раз вдоль направлений x или y соответственно. Затем нанолента сворачивается в элементарную ячейку нанотрубки. Нанотрубка еще может свернуться так, что слой с атомами халькогена окажется внутри или снаружи трубки.



*Рис. 2. Суперячейка монослоя SMoSiN_2 , используемого для создания нанотрубок
Fig. 2. Super cell of the SMoSiN_2 monolayer used to create nanotubes*



*Рис. 3. Нанотрубка SMoSiN_2 , полученная при $N_x = 1, N_y = 20$: а – элементарная ячейка;
б – рассчитанные полосовые структуры (ϵ_F – энергия Ферми); в – спектры поглощения
Fig. 3. SMoSiN_2 nanotube obtained with $N_x = 1, N_y = 20$: а – elementary cell;
b – calculated band structure (ϵ_F – Fermi energy); c – absorption spectra*

Элементарная ячейка нанотрубки SMoSiN_2 при $N_y = 20$ показана на рис. 3, а. После оптимизации согласно описанным условиям внутренний диаметр нанотрубки $D_{in} = 16,8 \text{ \AA}$, внешний диаметр $D_{out} = 26,6 \text{ \AA}$. Толщина трубчатого слоя $d = 4,92 \text{ \AA}$, толщина двумерного монослоя $h = 5,12 \text{ \AA}$. Это означает поперечное сужение слоя SMoSiN_2 в нанотрубке за счет расширения этого слоя при оптимизации трубки. Рассчитанные зонные структуры и спектры поглощения представлены на рис. 3, б, в. Рассматриваемая нанотрубка является полупроводниковой с узкой прямой зоной $E_g = 63,5 \text{ мэВ}$. Максимум спектра поглощения приходится на длину волны 510 нм. Нанотрубка характеризуется значительным оптическим поглощением во всем оптическом диапазоне.

Коэффициент оптического поглощения α определяется действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частью диэлектрической функции и рассчитывается по формуле

$$\alpha(\omega) = \sqrt{2} \frac{\omega}{c} \left(\sqrt{\epsilon_1^2(\omega) + \epsilon_2^2(\omega)} - \epsilon_1^2(\omega) \right)^{1/2},$$

где ω – частота; c – скорость света.

Зависимая от частоты комплексная диэлектрическая функция имеет вид

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \chi(\omega),$$

где $\chi(\omega)$ – диэлектрическая восприимчивость, рассчитанная в рамках формализма Кубо – Гринвуда, реализованного в пакете Quantum ATK:

$$\chi_{ij}(\omega) = -\frac{e^2 \hbar^4}{m^2 \epsilon_0 V \omega^2} \sum_{nm} \frac{f(E_m) - f(E_n)}{E_{nm} - \hbar\omega - i\Gamma} \pi_{nm}^i \pi_{nm}^j.$$

Здесь V – объем; f – функция Ферми – Дирака; $f(E_m)$ и $f(E_n)$ – функции заполнения уровней m и n ; $\Gamma = 0,1 \text{ эВ}$ – уширение; π_{nm}^i – дипольный матричный элемент между состояниями n и m .

Элементарная ячейка нанотрубки SMoSiN_2 при $N_x = 15$ показана на рис. 4, а. Внутренний диаметр нанотрубки $D_{in} = 21,55 \text{ \AA}$, внешний диаметр $D_{out} = 31,0 \text{ \AA}$. Толщина трубчатого слоя $d = 4,725 \text{ \AA}$, толщина двумерного монослоя $h = 5,12 \text{ \AA}$. Рассчитанные зонные структуры и спектры поглощения представлены на рис. 4, б, в. Рассматриваемая нанотрубка также является полупроводниковой, но ширина запрещенной зоны не прямая и значительно больше ($E_g = 565 \text{ мэВ}$). Максимумы спектра поглощения приходятся на длины волн 370 и 510 нм. Нанотрубка также характеризуется значительным оптическим поглощением во всем оптическом диапазоне и частично захватывает ультрафиолетовую область.

Элементарная ячейка нанотрубки SMoSiN_2 со слоем халькогена внутри при $N_x = 20$ представлена на рис. 5, а. Внутренний диаметр нанотрубки $D_{in} = 27,41 \text{ \AA}$, внешний диаметр $D_{out} = 37,52 \text{ \AA}$. Толщина трубчатого слоя составляет $d = 5,055 \text{ \AA}$, толщина двумерного монослоя $h = 5,12 \text{ \AA}$. Таким образом, поперечное сжатие слоя присутствует, но в меньшей степени, чем в предыдущих случаях. Рассчитанные зонные структуры и спектры поглощения представлены на рис. 5, б, в. Рассматриваемая нанотрубка также является полупроводниковой с непрямой запрещенной зоной ($E_g = 2,48 \text{ эВ}$). Максимумы спектра поглощения приходятся на длины волн 310 и 390 нм. Нанотрубка характеризуется малым оптическим поглощением в оптическом диапазоне, частично улавливает фиолетовые длины волн и ультрафиолетовую область.

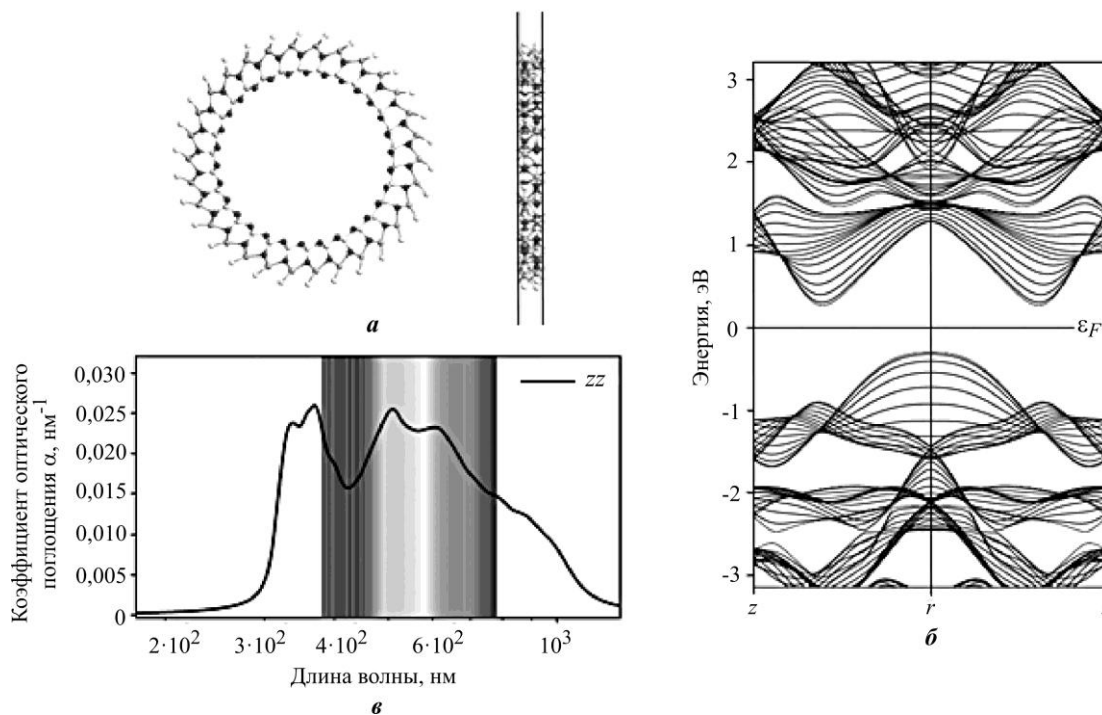


Рис. 4. Нанотрубка SMoSiN_2 , полученная при $N_x = 15, N_y = 1$: *a* – элементарная ячейка; *b* – рассчитанные полосовые структуры; *c* – спектры поглощения
 Fig. 4. SMoSiN_2 nanotube obtained with $N_x = 15, N_y = 1$: *a* – elementary cell; *b* – calculated band structure; *c* – absorption spectra

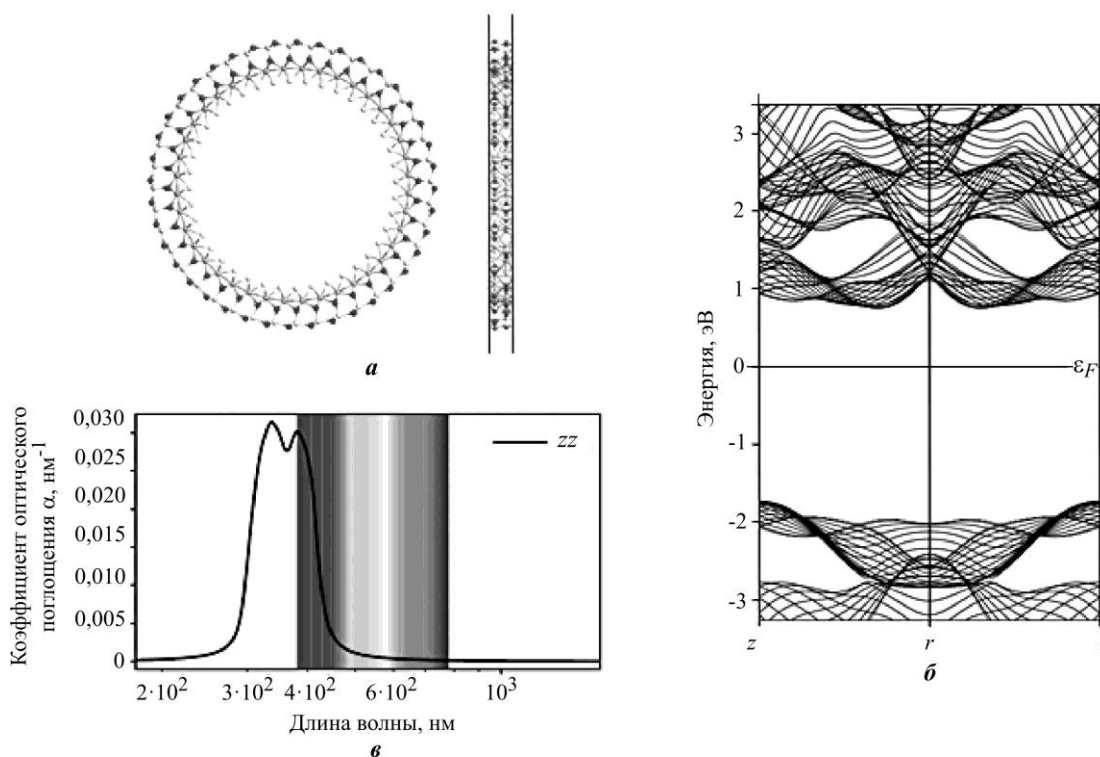


Рис. 5. Нанотрубка SMoSiN_2 , полученная при $N_x = 20, N_y = 1$: *a* – элементарная ячейка; *b* – рассчитанные полосовые структуры; *c* – спектры поглощения
 Fig. 5. SMoSiN_2 nanotube obtained with $N_x = 20, N_y = 1$: *a* – elementary cell; *b* – calculated band structure; *c* – absorption spectra

Таким образом, при расположении халькогена внутри трубки ширина запрещенной зоны может быть увеличена по сравнению с монослоем, а полоса поглощения смещена в ультрафиолетовую область. Если атомы халькогена расположены снаружи, нанотрубки характеризуются меньшими значениями ширины запрещенной зоны по сравнению с монослоем и хорошо поглощают электромагнитные волны в оптическом диапазоне.

Исследования показали, что продольная деформация нанотрубки приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны (рис. 6). При приложении напряжения нанотрубка $SMoSiN_2$ растягивается вдоль оси z . Полученные спектры оптического поглощения нанотрубок $SMoSiN_2$ разной конфигурации представлены на рис. 7 и 8. Видно, что при незначительном увеличении параметра C (длина трубки вдоль оси z) элементарной ячейки нанотрубки происходят небольшие изменения коэффициента поглощения, область поглощения не меняется. Но при большом параметре C ($3,43222 \text{ \AA}$) область поглощения расширяется в коротковолновый спектр. Коэффициент оптического поглощения нанотрубки при поляризации волны zz имеет более высокие показатели на частоте 1210 ТГц с приложением напряжения, растягивающего нанотрубку вдоль оси z . Параметры нанотрубок $SMoSiN_2$ разной конфигурации приведены в табл. 2. Для каждого значения коэффициента продольной деформации ϵ существует соответствующая конфигурация нанотрубки.

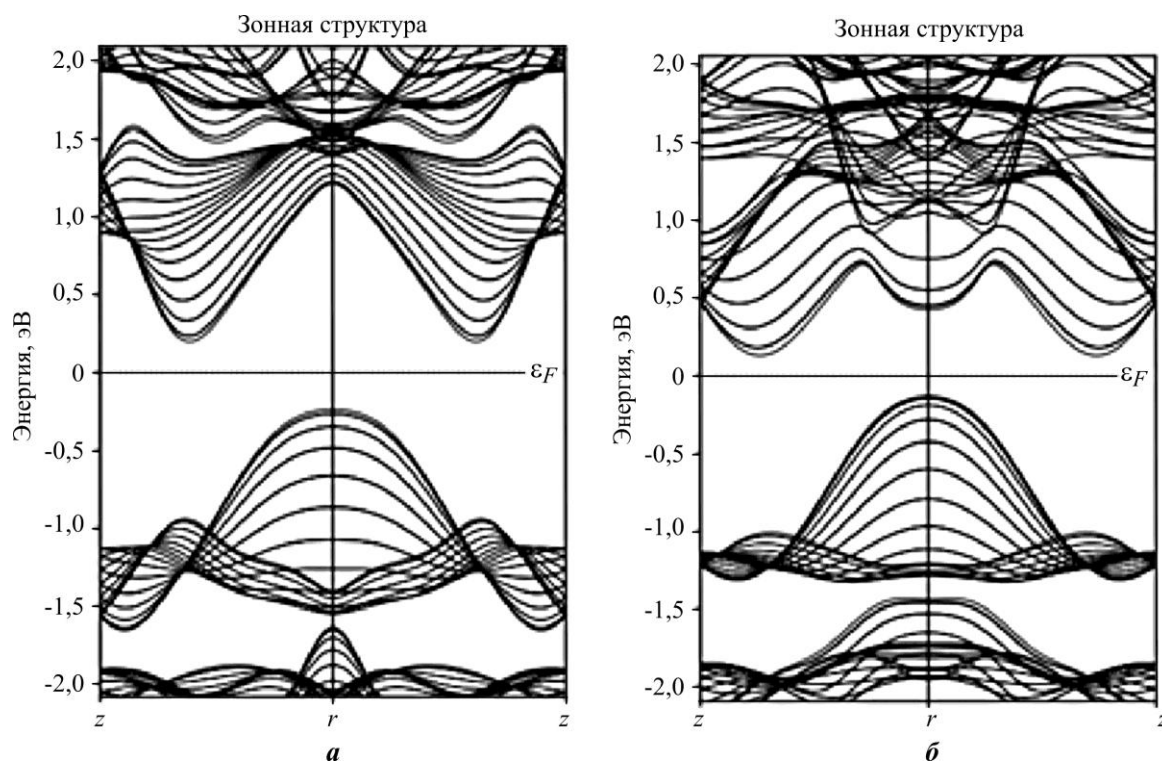


Рис. 6. Зонные структуры недеформированной (а) и деформированной ($\epsilon = 12,46 \%$) нанотрубки $SMoSiN_2$ (б)

Fig. 6. Band structures of $SMoSiN_2$ nanotube: a – undeformed; b – deformed ($\epsilon = 12.46 \%$)

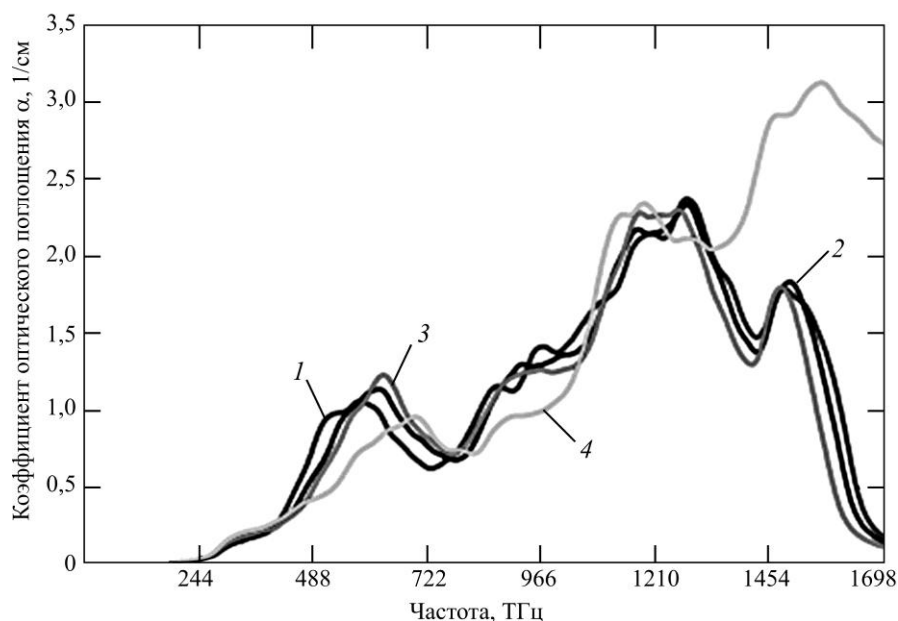


Рис. 7. Спектры оптического поглощения вдоль оси xx нанотрубок $SMoSiN_2$ при продольной деформации вдоль оси z : кривые 1–4 соответствуют конфигурациям нанотрубок (см. табл. 2)

Fig. 7. Optical absorption spectra along the xx axis of $SMoSiN_2$ nanotubes under longitudinal deformation along the z axis: curves 1–4 correspond to nanotube configurations (see Table 2)

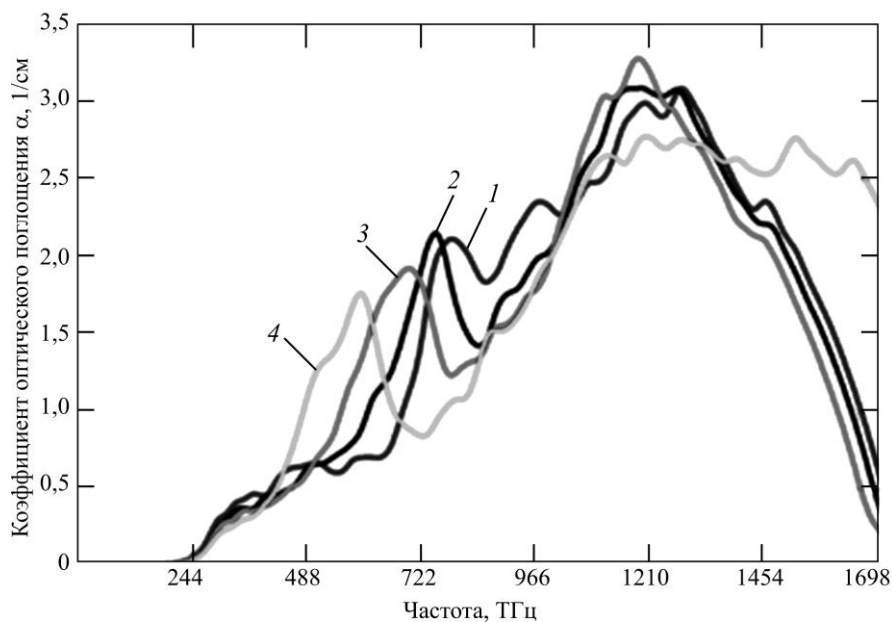


Рис. 8. Спектры оптического поглощения вдоль оси zz нанотрубок $SMoSiN_2$ при продольной деформации вдоль оси z : кривые 1–4 соответствуют конфигурациям нанотрубок (см. табл. 2)

Fig. 8. Optical absorption spectra along the zz axis of the $SMoSiN_2$ nanotubes during longitudinal deformation along the z axis: curves 1–4 correspond to nanotube configurations (see Table 2)

Таблица 2

Параметры нанотрубок SMoSiN_2 различной конфигурации

Table 2

Parameters of the SMoSiN_2 nanotubes of various configurations

Конфигурация нанотрубки	Продольная деформация ϵ , %	E_g , эВ (прямая запрещенная зона)	E_g , эВ (непрямая запрещенная зона)
1	0	1,14053	0,436331
2	2,74	1,15787	0,33665
3	5,82	1,09369	0,257695
4	12,46	0,555308	0,261621

Заключение. Исследование показало, что нанотрубки SMoSiN_2 типа Янус при расположении атомов халькогена внутри трубки характеризуются большим значением ширины запрещенной зоны, но малым оптическим поглощением в оптическом диапазоне. Однако при значительной продольной деформации нанотрубки оптическое поглощение расширяется в коротковолновой области спектра. При увеличении продольной деформации наблюдается уменьшение ширины запрещенной зоны. При уменьшении числа повторений ячейки вдоль оси Ox оптическое поглощение снижается. Однако при значительной продольной деформации нанотрубки вдоль оси z ($\epsilon = 12,46$ %) наблюдается широкий спектр оптического поглощения коротковолнового излучения.

Таким образом, нанотрубки SMoSiN_2 типа Янус проявляют себя как полупроводники, электронными и оптическими свойствами которых можно управлять путем их деформации. Исследуемые структуры могут быть перспективны для применения в оптоэлектронных устройствах, таких как солнечные элементы, светодиоды, лазеры и др. [7, 8].

Литература

1. Chemical vapor deposition of layered two-dimensional MoSi_2N_4 materials / **Y.-L. Hong, Z. Liu, L. Wang et al.** // Science. 2020. Vol. 369. Iss. 6504. P. 670–674. <https://doi.org/10.1126/science.abb7023>
2. Strain-induced semiconductor to metal transition in MA_2Z_4 bilayers (M = Ti, Cr, Mo; A = Si; Z = N, P) / **H. Zhong, W. Xiong, P. Lv et al.** // Phys. Rev. B. 2021. Vol. 103. Iss. 8. Art. ID: 085124. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.085124>
3. **Sibatov R. T., Meftakhtudinov R. M., Kochaev A. I.** Asymmetric XMoSiN_2 (X = S, Se, Te) monolayers as novel promising 2D materials for nanoelectronics and photovoltaics // Applied Surface Science. 2022. Vol. 585. Art. No. 152465. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152465>
4. QuantumATK: An integrated platform of electronic and atomic-scale modelling tools / **S. Smidstrup, T. Markussen, P. Vancraeyveld et al.** // J. Phys.: Condens. Matter. 2019. Vol. 32. No. 1. Art. No. 015901. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007>
5. The PseudoDojo: Training and grading a 85 element optimized norm-conserving pseudopotential table / **M. J. van Setten, M. Giantomassi, E. Bousquet et al.** // Computer Physics Communications. 2018. Vol. 226. P. 39–54. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.01.012>
6. **Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M.** Generalized gradient approximation made simple // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. Iss. 18. P. 3865–3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>
7. First-principles study on the structural properties of 2D MXene SnSiGeN_4 and its electronic properties under the effects of strain and an external electric field / **V. D. Dat, T. V. Vu, A. A. Lavrentyev et al.** // RSC Adv. 2022. Vol. 12. Iss. 45. P. 29113–29123. <https://doi.org/10.1039/D2RA05265B>
8. Novel Janus MoSiGeN_4 nanosheet: Adsorption behaviour and sensing performance for NO and NO_2 gas molecules / **Y. Weng, X. Ma, G. Yuan et al.** // RSC Adv. 2022. Vol. 12. Iss. 38. P. 24743–24751. <https://doi.org/10.1039/D2RA03957E>

Статья поступила в редакцию 29.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.01.2023 г.; принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Морозова Екатерина Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики Ульяновского государственного университета (Россия, 432700, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42), старший научный сотрудник лаборатории мемристивных систем на основе самоорганизованных наноструктур НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kat-valezhanina@yandex.ru

Тимкаева Диана Абдулхаковна – аспирант кафедры теоретической физики Ульяновского государственного университета (Россия, 432700, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42), инженер лаборатории мемристивных систем на основе самоорганизованных наноструктур НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dianatimkaeva@mail.ru

References

1. Hong Y.-L., Liu Z., Wang L., Zhou T., Ma W., Xu C., Feng S., Chen L. et al. Chemical vapor deposition of layered two-dimensional MoSi_2N_4 materials. *Science*, 2020, vol. 369, iss. 6504, pp. 670–674. <https://doi.org/10.1126/science.abb7023>
2. Zhong H., Xiong W., Lv P., Yu J., Yuan S. Strain-induced semiconductor to metal transition in MA_2Z_4 bilayers (M = Ti, Cr, Mo; A = Si; Z = N, P). *Phys. Rev. B*, 2021, vol. 103, iss. 8, art. ID: 085124. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.085124>
3. Sibatov R. T., Meftakhutdinov R. M., Kochaev A. I. Asymmetric XMoSiN_2 (X = S, Se, Te) monolayers as novel promising 2D materials for nanoelectronics and photovoltaics. *Applied Surface Science*, 2022, vol. 585, art. no. 152465. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152465>
4. Smidstrup S., Markussen T., Vancraeyveld P., Wellendorff J., Schneider J., Gunst T., Verstichel B., Stradi D., Khomyakov P. A., Vej-Hansen U. G. QuantumATK: An integrated platform of electronic and atomic-scale modelling tools. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2019, vol. 32, no. 1, art. no. 015901. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007>
5. Setten M. J. van, Giantomassi M., Bousquet E., Verstraete M. J., Hamann D. R., Gonze X., Rignanese G.-M. The PseudoDojo: Training and grading a 85 element optimized norm-conserving pseudopotential table. *Computer Physics Communications*, 2018, vol. 226, pp. 39–54. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.01.012>
6. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 77, iss. 18, pp. 3865–3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>
7. Dat V. D., Vu T. V., Lavrentyev A. A., Khyzhun O. Y., Hieu N. N., Tong H. D. First-principles study on the structural properties of 2D MXene SnSiGeN_4 and its electronic properties under the effects of strain and an external electric field. *RSC Adv.*, 2022, vol. 12, iss. 45, pp. 29113–29123. <https://doi.org/10.1039/D2RA05265B>
8. Weng Y., Ma X., Yuan G., Lv H., Yuan Zh. Novel Janus MoSiGeN_4 nanosheet: Adsorption behaviour and sensing performance for NO and NO_2 gas molecules. *RSC Adv.*, 2022, vol. 12, iss. 38, pp. 24743–24751. <https://doi.org/10.1039/D2RA03957E>

The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 23.01.2023;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Ekaterina V. Morozova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Theoretical Physics Department, Ulyanovsk State University (Russia, 432700, Ulyanovsk, Leo Tolstoy st., 42), Senior Scientific Researcher of the Memristive Systems Based on Self-Organized Nanostructures Laboratory, SMC “Technological Center” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kat-valezhanina@yandex.ru

Diana A. Timkaeva – PhD student of the Theoretical Physics Department, Ulyanovsk State University (Russia, 432700, Ulyanovsk, Leo Tolstoy st., 42), Engineer of the Memristive Systems Based on Self-Organized Nanostructures Laboratory, SMC “Technological Center” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dianatimkaeva@mail.ru

Термическая стабильность толстых пленок на основе низкотемпературных термоэлектрических материалов систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb, модифицированных добавками оксида меди

А. В. Бабич¹, И. А. Волощук¹, А. А. Шерченков¹, С. Ю. Переверзева²,
Д. Д. Глебова¹, Т. А. Бабич¹

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

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

drent@yandex.ru

Аннотация. Разработка гибких термоэлектрических генераторов – альтернативных источников энергии – с использованием технологии трафаретной печати является перспективным направлением. Для производства таких генераторов применяются низкотемпературные термоэлектрические материалы систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb. Улучшить свойства толсто пленочных образцов позволяет введение нанодисперсного высокопроводящего порошка оксида меди CuO. Однако термическая стабильность подобных материалов до сих пор практически не изучена. В работе исследованы термические свойства и стабильность толстых пленок на основе низкотемпературных термоэлектрических материалов систем Bi-Te-Se (*n*-тип) и Bi-Te-Sb (*p*-тип), легированных CuO. Определено, что толсто пленочные образцы, содержащие 0,1 % добавки CuO, имеют наилучшие термоэлектрические характеристики. Показано, что в исследованном температурном диапазоне (от комнатной температуры до 550 К) образцы стабильны, отсутствуют ярко выраженные тепловые эффекты и изменения массы образцов. Кроме того, многократные измерения не приводят к разделению фаз или другим нежелательным процессам. Установлено, что толстые пленки на основе низкотемпературных термоэлектрических материалов систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb, модифицированных добавками оксида меди, могут применяться для изготовления гибких термоэлектрических устройств.

Ключевые слова: термоэлектричество, термические свойства, стабильность, термоэлектрический генератор

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-19-00312 (синтез материалов), проект № 18-79-10231 (формирование образцов и их характеристика)).

Для цитирования: Термическая стабильность толстых пленок на основе низкотемпературных термоэлектрических материалов систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb, модифицированных добавками оксида меди / А. В. Бабич, И. А. Волощук, А. А. Шерченков и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 281–286. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-281-286>. – EDN: WТАКОХ.

Thermal stability of thick films on the basis of Bi-Te-Se and Bi-Te-Sb low-temperature thermoelectric materials modified by copper oxide additives

**A. V. Babich¹, I. A. Voloshchuk¹, A. A. Sherchenkov¹, S. Yu. Pereverzeva²,
D. D. Glebova¹, T. A. Babich¹**

¹*National Research University of Electronic Technology Moscow, Russia*

²*SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia*

drent@yandex.ru

Abstract. The development of flexible thermoelectric generators – alternative energy sources – using screen printing technology is a promising direction. Currently, low-temperature thermoelectric materials based on Bi-Te-Se and Bi-Te-Sb are used for manufacturing of these generators. The introduction of nanodispersed highly conductive copper oxide CuO powder allows the improvement of thick-film samples’ characteristics. However, the thermal stability of such materials has not been studied to date. In this work, thermal properties and stability of thick films on the basis of Bi-Te-Se (*n* type) and Bi-Te-Sb (*p* type) doped with CuO are studied. It was determined that thick-film samples containing 0.1 % CuO as additive have the best thermoelectric characteristics. It was shown that in the investigated temperature range (from room temperature up to 550 K) they are stable, there are no strong thermal effects nor change in the mass of the samples. In addition, multiple measurements do not lead to phase separation or other undesirable processes. It has been established that thick films on the basis of Bi-Te-Sb and Bi-Te-Se low-temperature thermoelectric materials modified by copper oxide additives can be used for flexible thermoelectric devices manufacturing.

Keywords: thermoelectricity, thermal properties, stability, thermoelectric generator, TEG

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-19-00312 (synthesis of the materials), project no. 18-79-10231 (formation of the samples and their characterization)).

For citation: Babich A. V., Voloshchuk I. A., Sherchenkov A. A., Pereverzeva S. Yu., Glebova D. D., Babich T. A. Thermal stability of thick films on the basis of Bi-Te-Se and Bi-Te-Sb low-temperature thermoelectric materials modified by copper oxide additives. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 281–286. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-281-286>. – EDN: WТАКОХ.

Введение. Гибкие термоэлектрические генераторы (ТЭГ) в настоящее время востребованы во многих областях науки и техники, например, для питания носимой электроники (телефоны, часы, медицинские датчики и т. д.) [1–5], датчиков теплового тока. В носимой электронике для преобразования в электричество используются тепловые потоки малой интенсивности, для питания датчиков теплового потока применение ТЭГ позволяет значительно повысить энергоэффективность зданий и сооружений [6]. Для

производства гибких ТЭГ перспективной является технология трафаретной печати. В работе [7] показаны преимущества такой толстопленочной технологии, в частности простота и доступность.

На сегодняшний день материалы на основе систем Bi-Te-Se (*n*-тип проводимости) и Bi-Te-Sb (*p*-тип проводимости) остаются наиболее эффективными в низкотемпературном диапазоне, в котором работают гибкие ТЭГ (от комнатной температуры до ≈ 550 К) [8]. Однако такие материалы имеют сравнительно высокое удельное сопротивление, поэтому для дальнейшего совершенствования технологии производства гибких ТЭГ необходима оптимизация свойств термоэлектрических материалов. Предварительные исследования показали, что введение в материалы на основе Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb нанодисперсной высокопроводящей добавки оксида меди CuO позволяет снизить их удельное сопротивление. Однако термическая стабильность данных материалов практически не изучена.

В настоящей работе исследуются термоэлектрические свойства и термическая стабильность толстопленочных образцов Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb, легированных CuO.

Методика эксперимента. Термоэлектрические материалы систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb синтезировали прямым синтезом в кварцевых ампулах из элементов полупроводниковой чистоты [9]. Далее готовили различные составы суспензий на основе порошков термоэлектрических материалов с массовой долей нанодисперсного высокопроводящего CuO до 2 %. В качестве связующего применяли водно-щелочной раствор силиката натрия [8].

Для формирования ветвей термоэлементов *n*- и *p*-типа термоэлектрический материал, связующее и добавку CuO смешивали в необходимом соотношении, после чего готовой суспензией заполняли металлическую маску с шестью окнами. Геометрические параметры окна $10,0 \times 5,0 \times 0,3$ мм. Далее образцы высушивали при комнатной температуре в течение 24 ч, после чего проводили двухстадийный отжиг: 4 ч при температуре 383 К и 15 мин при температуре 473 К. Поскольку при сушке образцы деформировались (появлялся небольшой изгиб ветвей), после сушки их подвергали шлифовке с двух сторон.

Термические свойства подготовленных образцов исследовали с использованием дифференциального сканирующего калориметра Netzsch DSC 204 F1 Phoenix и прибора синхронного анализа Netzsch STA 449 F3 Jupiter. Для каждого образца проведено пять измерений в диапазоне температур от комнатной до 570 К при скорости нагрева 10 град/мин в атмосфере азота. Использовали алюминиевые тигли. В качестве образца для сравнения применяли пустой алюминиевый тигель.

Исследование термоэлектрических и электрофизических параметров проводили на разработанном аппаратно-программном комплексе [10], позволяющем создавать необходимый градиент температур на холодной и горячей сторонах термоэлементов. Нагрев исследуемых ветвей термоэлемента осуществляли в диапазоне 268–403 К с разницей температур между холодным и горячим концами 5 К. Формирование электрических контактов к ветвям осуществляли методом электрохимического осаждения.

Результаты и их обсуждение. Проведены исследования электрофизических и термоэлектрических свойств материалов систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb с различными концентрациями легирующей добавки CuO. В частности, исследованы удельное сопротивление, коэффициент термоЭДС, электропроводность. На основании полученных результатов рассчитан фактор мощности. Выявлено, что наилучшие результаты показывают материалы с содержанием 0,1 % примеси CuO. График зависимости фактора мощности от температуры для легированных и нелегированных материалов систем

Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb представлен на рис. 1. Максимум фактора мощности для ветви *n*-типа с содержанием 0,1% CuO составляет 3,5 мкВт/(см·К²), для ветви *p*-типа – 3,8 мкВт/(см·К²).

Термические характеристики и термическая стабильность материалов систем Bi-Te-Se и Bi-Te-Sb с содержанием 0,1 % примеси CuO исследовали методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГА). Результаты пяти измерений каждым методом фактически совпадают. На рис. 2 приведены результаты измерений образца *n*-типа.

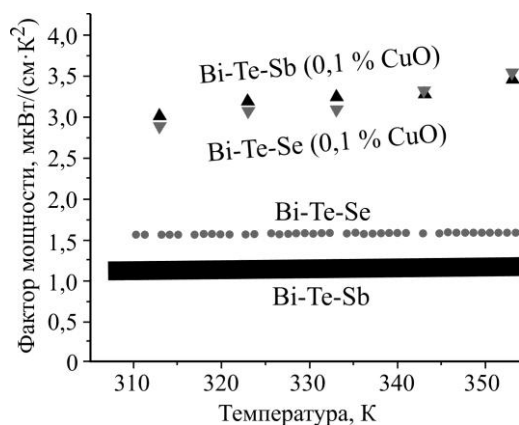


Рис. 1. Зависимость фактора мощности от температуры для легированных и нелегированных материалов систем Bi-Te-Se (*n*-тип) и Bi-Te-Sb (*p*-тип)

Fig. 1. Dependence of the power factor on temperature for alloyed and unalloyed materials of Bi-Te-Se (*n* type) and Bi-Te-Sb (*p* type) systems

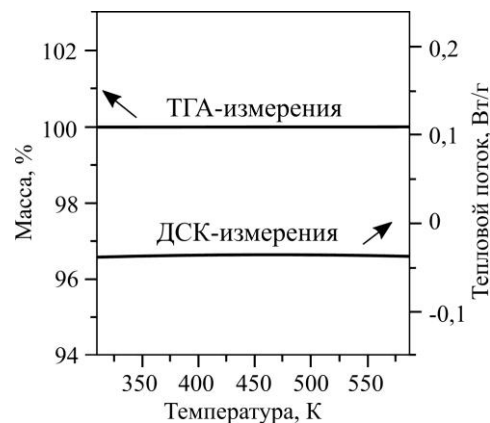


Рис. 2. Результаты измерений термических характеристик методами ДСК и ТГА материала системы Bi-Te-Se (*n*-тип), легированного 0,1 % CuO

Fig. 2. Results of five measurements of thermal characteristics by DSC and TGA methods of Bi-Te-Se (*n* type) system material doped with 0.1 % CuO

Из рис. 2 видно, что во всем исследуемом температурном диапазоне (от комнатной температуры до 570 К) толсто пленочные образцы стабильны, отсутствуют ярко выраженные тепловые эффекты и изменения массы образцов. Кроме того, многократные измерения не приводят к разделению фаз или другим нежелательным процессам. Аналогичное поведение наблюдается и для образца *p*-типа.

Заключение. Исследование показало, что толстые пленки низкотемпературных термоэлектрических материалов систем Bi-Te-Se (*n*-тип) и Bi-Te-Sb (*p*-тип), легированные 0,1 % CuO, стабильны в необходимом температурном диапазоне и перспективны для изготовления гибких термоэлектрических устройств.

Литература

1. A comprehensive review of thermoelectric generators: Technologies and common applications / *N. Jaziri, A. Boughamora, J. Müller et al.* // Energy Reports. 2020. Vol. 6 (7). P. 264–287. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.011>
2. *He R., Schierning G., Nielsch K.* Thermoelectric devices: A review of devices, architectures, and contact optimization // Adv. Mater. Technol. 2018. Vol. 3. Iss. 4. Art. No. 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>
3. *Champier D.* Thermoelectric generators: A review of applications // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 140. P. 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
4. *Siddique A. R. M., Mahmud S., Heyst B. V.* A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 73. P. 730–744. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.177>

5. Characteristics and parametric analysis of a novel flexible ink-based thermoelectric generator for human body sensor / **S. Qing, A. Rezania, L. A. Rosendahl et al.** // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 156. P. 655–665. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.065>
6. **Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G.** Advanced thermoelectric design: From materials and structures to devices // *Chem. Rev.* 2020. Vol. 120. Iss. 15. P. 7399–7515. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00026>
7. **Voloshchuk I. A., Terekhov D. Yu., Pepelyaev D. V., Sherchenkov A. A.** Investigation of the electrophysical and thermoelectric properties of films fabricated by screen-printing // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2020. P. 2221–2224. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039538>
8. Thermoelectric materials: Current status and future challenges / **P. A. Finn, C. Asker, K. Wan et al.** // *Front. Electron. Mater.* 2021. Vol. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.3389/femat.2021.677845>
9. Mechanical properties and thermal stability of nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe and GeTe / **M. Shtern, A. Sherchenkov, Yu. Shtern et al.** // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 946. Art. No. 169364. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169364>
10. **Terekhov D. Yu.** Precise setup for simultaneous measurement of thermoelectric and electrophysical properties of thin films in wide temperature range // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2020. P. 2202–2207. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039041>

Статья поступила в редакцию 27.02.2023 г.; одобрена после рецензирования 07.03.2023 г.;
принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Бабич Алексей Вальтерович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), drent@yandex.ru

Волощук Ирина Андреевна – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), raccoon13vol@gmail.com

Шерченков Алексей Анатольевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aa_sherchenkov@rambler.ru

Переверзева Светлана Юрьевна – младший научный сотрудник НПЦ «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), nemtseva1@mail.ru

Глебова Дарья Денисовна – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dariag99@mail.ru

Бабич Татьяна Александровна – лаборант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tibloko4545@gmail.com

References

1. Jaziri N., Boughamoura A., Müller J., Mezghani B., Tounsi F., Ismail M. A comprehensive review of thermoelectric generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, 2020, vol. 6 (7), pp. 264–287. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.011>
2. He R., Schierning G., Nielsch K. Thermoelectric devices: A review of devices, architectures, and contact optimization. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, vol. 3, iss. 4, art. no. 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>

3. Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 140, pp. 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
4. Siddique A. R. M., Mahmud S., Heyst B. V. A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 73, pp. 730–744. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.177>
5. Qing S., Rezanian A., Rosendahl L. A., Enkeshafi A. A., Gou X. Characteristics and parametric analysis of a novel flexible ink-based thermoelectric generator for human body sensor. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 156, pp. 655–665. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.065>
6. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: From materials and structures to devices. *Chem. Rev.*, 2020, vol. 120, iss. 15, pp. 7399–7515. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00026>
7. Voloshchuk I. A., Terekhov D. Yu., Pepelyaev D. V., Sherchenkov A. A. Investigation of the electrophysical and thermoelectric properties of films fabricated by screen-printing. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2020, pp. 2221–2224. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039538>
8. Finn P. A., Asker C., Wan K., Bilotti E., Fenwick O., Nielsen C. B. Thermoelectric materials: Current status and future challenges. *Front. Electron. Mater.*, 2021, vol. 1, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3389/femat.2021.677845>
9. Shtern M., Sherchenkov A., Shtern Yu., Borgardt N., Rogachev M., Yakubov A., Babich A., Pepelyaev D., Voloshchuk I., Zaytseva Yu. et al. Mechanical properties and thermal stability of nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe and GeTe. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 946, art. no. 169364. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169364>
10. Terekhov D. Precise setup for simultaneous measurement of thermoelectric and electrophysical properties of thin films in wide temperature range. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2020, pp. 2202–2207. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039041>

The article was submitted 27.02.2023; approved after reviewing 07.03.2023;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Alexey V. Babich – Cand. Sci. (Eng.), Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), drent@yandex.ru

Irina A. Voloshchuk – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), raccoon13vol@gmail.com

Alexey A. Sherchenkov – 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), aa_sherchenkov@rambler.ru

Svetlana Yu. Pereverzeva – Junior Scientific Researcher, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), nemtseva1@mail.ru

Daria D. Glebova – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dariag99@mail.ru

Tatyana A. Babich – Laboratory Assistant of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tibloko4545@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья

УДК 539.22:620.18:621.794.4:546.28:53.087

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-3-287-297

EDN: VDYIAL

Исследование зависимости формы кремниевых игл от концентрации раствора КОН при жидкостном анизотропном травлении

А. В. Новак^{1,2}, А. М. Соколов^{1,2}, А. В. Румянцев¹, В. Р. Новак³

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

г. Москва, Россия

²АО «Ангстрем», г. Москва, Россия

³ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс», г. Москва, Россия

Novak@angstrem.ru

Аннотация. Наиболее распространенным и доступным методом, применяемым при изготовлении игл из пластин монокристаллического кремния, является анизотропное жидкостное травление. Зависимость формы и размеров игл от концентрации травящего раствора при использовании одного типа маски (круглой, квадратной или другой формы) изучена недостаточно полно. Данные о форме, размере и аспектном отношении получаемых игл для высоких концентраций водного раствора КОН (более 50 %) практически не приводятся. В работе изучена зависимость формы, размеров и аспектного отношения кремниевых игл пирамидальной формы, полученных при анизотропном травлении кремния в водном растворе КОН, от концентрации раствора в интервале 30–75 %. Проведены расчеты индексов Миллера (hkl) для плоскостей, образующих грани игл. Показано, что использование высоких концентраций водного раствора КОН (70 и 75 %) позволяет изготавливать иглы в форме восьмиугольных пирамид, сохраняющих форму на всей высоте. На остриях таких игл практически отсутствуют дефекты в виде «микролезвий», тогда как при меньших концентрациях водного раствора КОН (30 и 50 %) «микролезвия» наблюдаются практически на всех иглах. Установлено, что при травлении кремния в 75%-ном водном растворе КОН формируются иглы с наибольшей высотой (12–14 мкм) и максимальным аспектным отношением, равным 1,72 мкм, боковые грани игл образованы восемью плоскостями из семейства $\{411\}$ и $\{141\}$.

Ключевые слова: анизотропное травление в КОН, кремниевая игла, кантилевер, атомно-силовая микроскопия

Для цитирования: Новак А. В., Соколов А. М., Румянцев А. В., Новак В. Р. Исследование зависимости формы кремниевых игл от концентрации раствора KOH при жидкостном анизотропном травлении // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 287–297. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-287-297>. – EDN: VDYIAL.

Original article

Investigation of the dependence of the silicon needles shape on the KOH solution concentration during wet anisotropic etching

A. V. Novak^{1,2}, A. M. Sokolov^{1,2}, A. V. Rumyantsev¹, V. R. Novak³

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²“Angstrom” JSC, Moscow, Russia

³“NT-MDT Spectrum Instruments” LLC, Moscow, Russia

Novak@angstrom.ru

Abstract. The most common and available method used in the manufacture of needles from single-crystal silicon wafers is anisotropic wet etching. In the literature, the dependence of the shape and size of the needles on the concentration of the etching solution when using one type of mask (round, square, or other shape) has not been fully studied. Data on the shape, size, and aspect ratio of the obtained needles for high concentrations of an aqueous solution of KOH (more than 50 %) are practically not given. In this work, the dependence of the shape, dimensions and aspect ratio for pyramidal needles obtained by anisotropic etching of silicon in aqueous solution of KOH on concentration in the range 30–75 % is studied. The Miller indices (hkl) are calculated for the planes forming the faces of the needles. It was shown that the use of high concentrations of KOH solution (70 and 75 %) makes it possible to produce needles in the form of octagonal pyramids that retain their shape over the entire height. There are practically no “microblade” type defects on the tips of these needles, while at lower KOH concentrations (30 and 50 %), “microblades” are observed on almost all needles. It has been established that during silicon etching in aqueous solution of KOH with a concentration of 75 %, needles are formed with the largest height (12–14 μm) and a maximum aspect ratio equal to 1.72 μm ; the side faces of the needles are formed by eight planes from the {411} and {141} families.

Keywords: anisotropic etching in KOH, silicon tip, cantilever, atomic force microscopy

For citation: Novak A. V., Sokolov A. M., Rumyantsev A. V., Novak V. R. Investigation of the dependence of the silicon needles shape on the KOH solution concentration during wet anisotropic etching. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 287–297. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-287-297>. – EDN: VDYIAL.

Введение. Важным элементом зондовых датчиков (кантилеверов) для атомно-силовой микроскопии (АСМ) [1–7], эмиссионных катодов [1, 8–10], а также в МЭМС-устройствах [1–7, 11, 12] является кремниевая игла. В настоящее время существуют различные технологии изготовления кремниевых игл, основанные на анизотропном травлении [1–4], изотропном жидкостном травлении, сухом плазмохимическом травлении кремния или их комбинации [7, 9, 10].

Один из наиболее распространенных и доступных методов, применяемых при изготовлении игл из пластин кремния с ориентацией (100), – анизотропное жидкостное травление в гидроксиде калия КОН или тетраметиламмония (ТМАН). Иглы, получаемые таким образом, имеют форму пирамиды, боковые грани которой образованы несколькими различными кристаллографическими плоскостями [1–4, 13–17]. В основном при изготовлении игл используют маски в форме квадрата или круга и сравнительно небольшую концентрацию водного раствора КОН (20–40 %) [1–4, 13–16]. Однако при травлении кремния в водном растворе КОН с применением квадратной или круглой маски наблюдается большой разброс размеров и формы игл по пластине [1, 13, 14]. Иглы часто получаются неправильной формы, образуются дефекты в виде «микролезвий» на вершинах, т. е. не все грани, образующие иглу, сходятся в вершину. Для решения данной проблемы в работах [1, 2] изучен процесс изготовления кремниевых игл с трехгранной вершиной с помощью треугольной и пятиугольной масок, стороны которых специальным образом ориентированы относительно кристаллографического направления [110].

В то же время зависимость формы и размеров пирамидальных игл от концентрации травящего раствора при использовании одного типа маски (круглой, квадратной или другой определенной формы) изучена недостаточно. Данные о форме, размере и аспектном отношении получаемых игл для высоких концентраций водного раствора КОН (более 50 %) практически не приводятся.

В настоящей работе изучается процесс изготовления кремниевых игл, пригодных для использования в зондовых датчиках АСМ. Исследуется процесс изготовления кремниевых игл пирамидальной формы при травлении в водном растворе КОН в широком интервале концентраций (от 30 до 75 %) с использованием маски в форме круга. С помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) изучается форма, размеры и аспектное отношение полученных игл, а также проводится сравнительный анализ формы и расчет индексов Миллера (*hkl*) кристаллографических плоскостей для игл, полученных в 30, 50, 70 и 75%-ном водном растворе КОН.

Методика эксперимента. Иглы изготавливали из пластин монокристаллического кремния с ориентацией (100), легированного бором (КДБ 12). Для травления игл использовали маскирующее покрытие из термического оксида кремния SiO₂ в форме круга диаметром 45 мкм. Толщина маски составляла 1,3 мкм. Такая достаточно большая толщина необходима для того, чтобы не происходило стравливания маски в процессе формирования кремниевых игл при травлении в водном растворе КОН. В ходе эксперимента концентрацию водного раствора КОН варьировали от 30 до 75 %. Концентрация определяется как отношение массы КОН к массе водного раствора:

$$C = \frac{m_{\text{КОН}}}{m_{\text{КОН}} + m_{\text{вода}}} \cdot 100\%.$$

Температура водного раствора КОН составляла 90 °С при концентрации 30 %; 100 °С при 50 %; 125 °С при 70 % и 135 °С при 75 %. Повышение температуры обусловлено тем, что для большей концентрации требуется более высокая температура, чтобы полностью растворить КОН. Скорости травления в направлении [100] составляли: 2,22; 2,18; 0,94; 0,94 мкм/мин соответственно при концентрациях 30; 50; 70; 75 %. Скорость травления для каждой концентрации определяли как отношение толщины стравленного слоя кремния ко времени, необходимому для формирования иглы. При травлении раствор перемешивали для предотвращения микромаскирования пузырьками водорода, образующимися при травлении. Процесс травления проводили до момен-

та удаления маски с кончика формируемой иглы. Контроль окончания процесса травления осуществляли посредством наблюдения момента удаления маски с помощью оптического микроскопа (Leitz Ergolux АМС).

На рис. 1 показаны фотографии формируемой иглы (вид сверху) с круглой маской из SiO_2 диаметром 45 мкм и без маски. Полученные иглы измеряли с помощью РЭМ (Helios Nanolab 650 FEI). Геометрические параметры игл, такие как высота, размеры у основания и аспектное отношение, рассчитывали по РЭМ-изображениям.

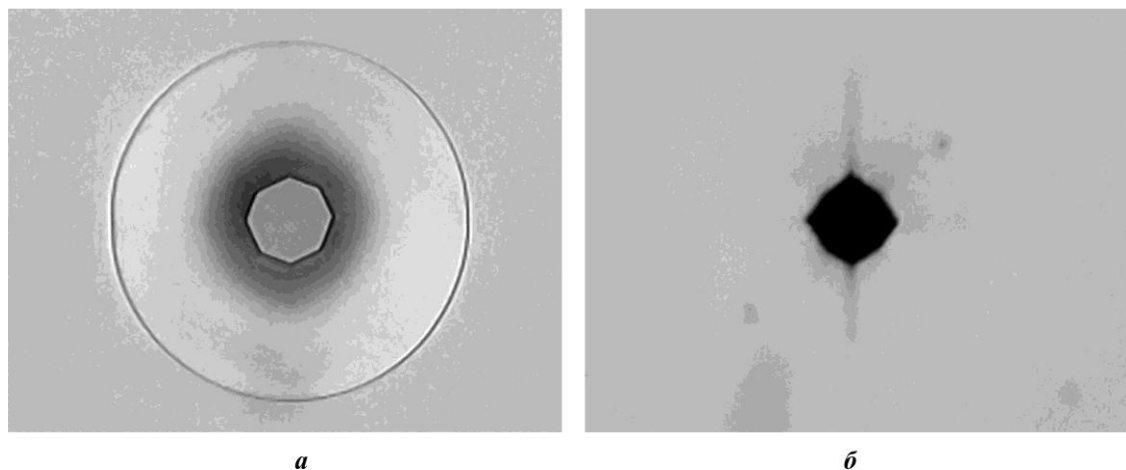


Рис. 1. Фотографии формируемой иглы (вид сверху): *a* – с круглой маской из SiO_2 ; *b* – без маски
Fig. 1. Images of the formed needle (top view): *a* – with a round SiO_2 mask that has not yet flown off; *b* – with the mask off

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 показаны снятые под углами 0 и 52° к нормали РЭМ-изображения кремниевых игл, полученных при травлении в 30 и 50%-ном водном растворе КОН. Время травления при формировании игл в 30%-ном растворе составило около 6 мин, в 50%-ном растворе – 7,5 мин. Из РЭМ-изображений видно, что иглы, полученные в 30%-ном водном растворе КОН, имеют форму неправильной пирамиды, т. е. не все грани, образующие иглу, сходятся в вершину, также почти на всех иглах наблюдаются «микролезвия». Иглы, полученные в 50%-ном растворе, уже имеют форму, близкую к восьмиугольной пирамиде. Однако и в этом случае не все грани сходятся в вершину. Высота полученных игл при обеих концентрациях менее 10 мкм. Важной характеристикой иглы является аспектное отношение, которое определяется как отношение высоты иглы к ее латеральному размеру у основания в направлении [110]. Для игл, полученных в 30 и 50%-ном растворе, аспектное отношение составляет приблизительно 1,25 и 1,38 соответственно.

На рис. 3 показаны РЭМ-изображения кремниевых игл, полученных при травлении в 70 и 75%-ном водном растворе КОН. Изображения сняты под углами 0 и 52° к нормали. В данном случае для формирования игл требуется более длительное время травления, которое составило приблизительно 16–17 мин. Это, в свою очередь, позволяет лучше контролировать процесс формирования игл и, как следствие, получать иглы с более контролируемыми геометрическими размерами, такими как высота и размер у основания. Из РЭМ-изображений видно, что полученные иглы имеют форму восьмиугольной пирамиды, все грани, образующие иглу, сходятся в вершину. Высота игл варьируется от 12 до 14 мкм, аспектное отношение составляет 1,39–1,41 для игл, полученных в 70%-ном растворе, и 1,70–1,72 для игл, полученных в 75%-ном растворе (максимальное значение).

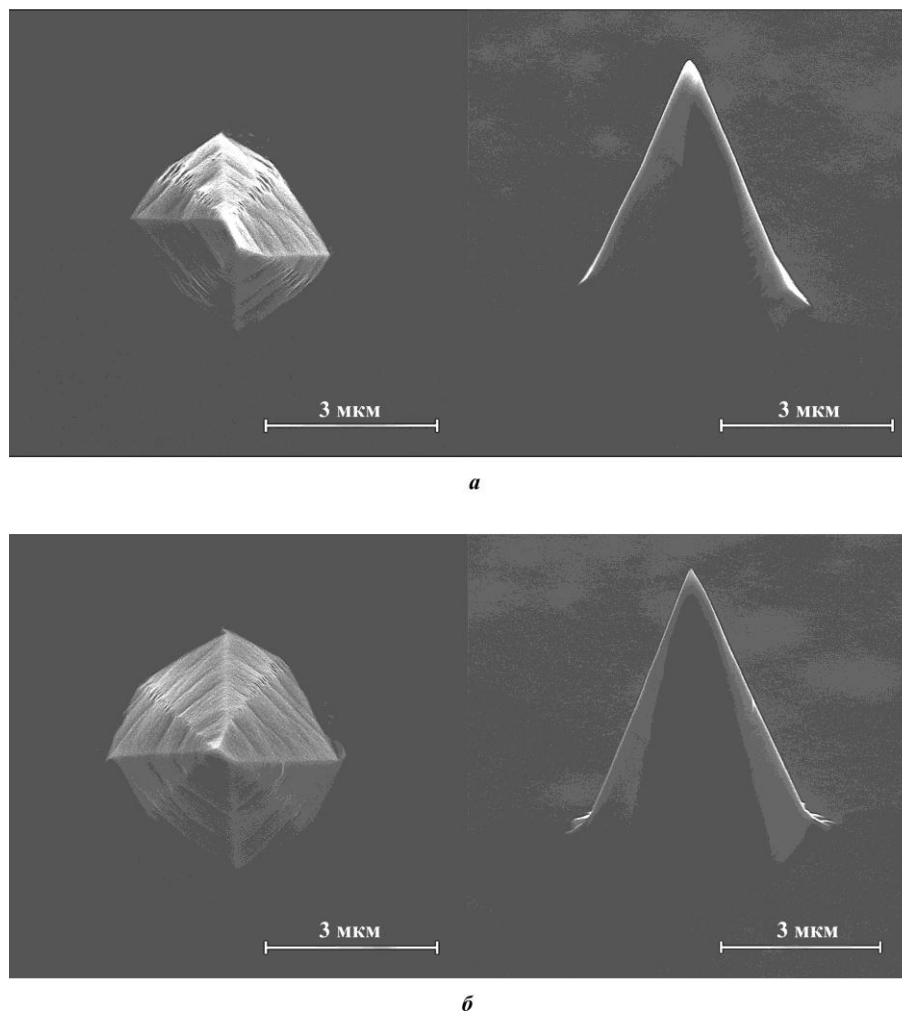
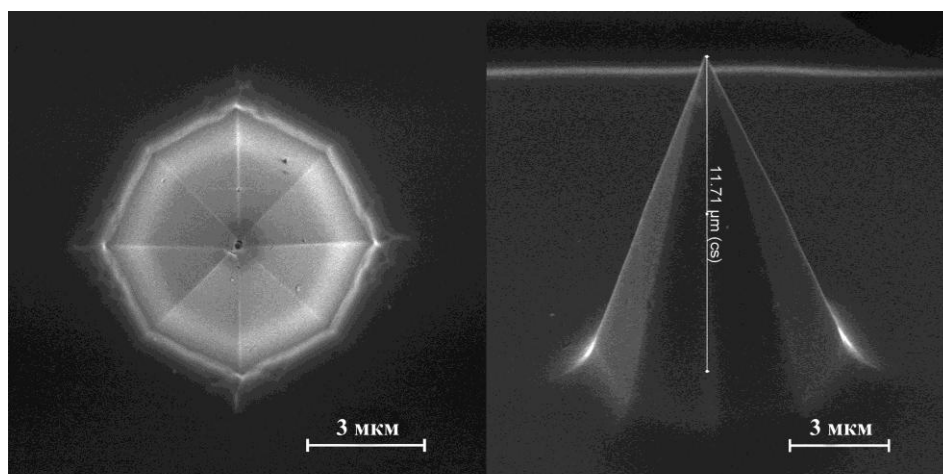
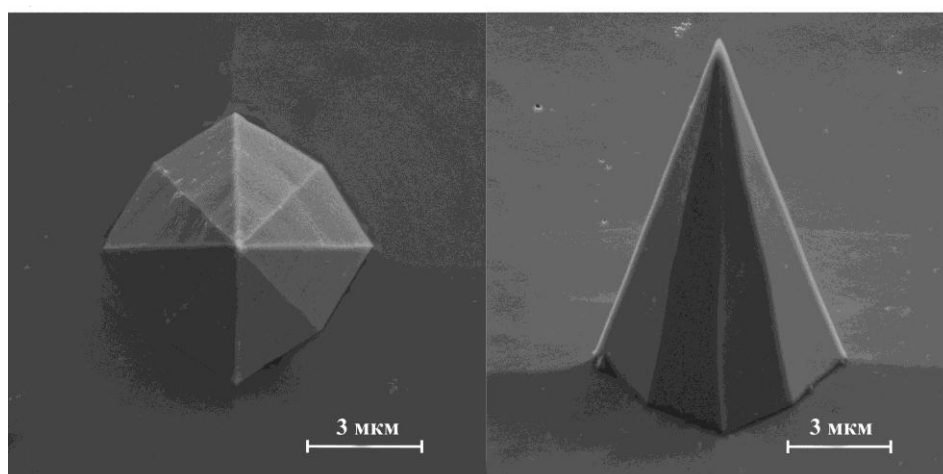


Рис. 2. РЭМ-изображения кремниевых игл, полученных при травлении в 30%-ном (а) и 50%-ном (б) водном растворе KOH
Fig. 2. SEM images of silicon needles obtained by etching in a KOH solution with a concentration of 30 (a) and 50 % (b)

Для игл, полученных травлением при различных концентрациях водного раствора KOH, рассчитаны индексы Миллера (hkl) плоскостей, образующих грани игл. Согласно работе [17] при травлении в водном растворе KOH одними из наиболее распространенных плоскостей, образующих различные трехмерные островковые структуры, являются плоскости, перпендикулярные направлениям [221], [331], [441] или [211], [311], [411]. На рис. 4 приведены РЭМ-изображения игл (вид сверху), полученных в 30, 50, 70 и 75%-ном растворе, с наложенным восьмиугольником, который повторяет контуры основания иглы. Для иглы, полученной в 30%-ном растворе, восьмиугольник образован линиями, которые перпендикулярны направлениям [210], характерный угол между направлениями [210] и [110] составляет $\alpha \approx 18,43^\circ$. Видно, что игла сильно несимметрична, и определить кристаллографические плоскости, образующие основную часть иглы и ближе к ее кончику, практически невозможно. Тем не менее в основании данных игл наблюдаются кристаллографические плоскости, наиболее близкие к семейству {221}. Это согласуется с данными, приведенными в работе [16], где в 30%-ном водном растворе получали иглы с основанием в форме восьмиугольника, стороны которого перпендикулярны направлению [210].



а



б

Рис. 3. РЭМ-изображения кремниевых игл, полученных при травлении в 70%-ном (а) и 75%-ном (б) водном растворе КОН
Fig. 3. SEM images of silicon needles obtained by etching in a KOH solution with a concentration of 70 (a) and 75 % (b)

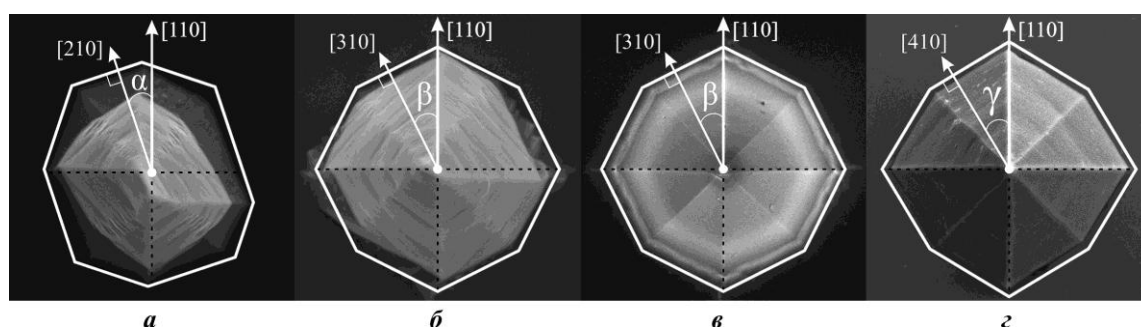


Рис. 4. РЭМ-изображения игл (вид сверху), полученных при травлении в 30%-ном (а), 50%-ном (б), 70%-ном (в), 75%-ном (г) водном растворе КОН, с наложенным восьмиугольником, повторяющим контуры основания иглы
Fig. 4. Top view SEM images of needles taken at 30 % (a), 50 % (b), 70 (c), and 75 % (d) concentrations with superimposed octagon that follows the contours of the needle base

Стороны восьмиугольника, лежащего в основании, для игл, полученных в 50 и 70%-ном водном растворе KOH, перпендикулярны направлениям [310], характерный угол между направлениями [310] и [110] составляет $\beta \approx 26,57^\circ$. По-видимому, иглы полученные в 50%-ном растворе, образуют грани, близкие к плоскостям из семейства {311} и {131}. Однако при такой концентрации не удается сохранить начальную форму (у основания иглы) на всей высоте иглы и не все грани сходятся в вершину. Иглы, полученные в 70%-ном растворе, формируют грани в виде восьмиугольных пирамид, сохраняющих форму на всей своей высоте. Форма иглы образована восемью плоскостями (311), ($\bar{3}11$), ($3\bar{1}1$), ($\bar{3}\bar{1}1$), (131), ($\bar{1}31$), ($1\bar{3}1$), ($\bar{1}\bar{3}1$). Стороны восьмиугольника, лежащего у основания игл, полученных в 75%-ном растворе, перпендикулярны направлениям [410], угол между направлениями [410] и [110] составляет $\gamma \approx 30,96^\circ$. Форма иглы образована восемью плоскостями (411), ($\bar{4}11$), ($4\bar{1}1$), ($\bar{4}\bar{1}1$), (141), ($\bar{1}41$), ($1\bar{4}1$), ($\bar{1}\bar{4}1$) и сохраняется на всей высоте.

Построены две модели восьмиугольных игл (рис. 5), образованных восемью кристаллографическими плоскостями из семейств {311}, {131} и {411}, {141}, и проведен сравнительный анализ их геометрических характеристик с иглами, полученными в 70 и 75%-ном водном растворе KOH. Аспектное отношение, рассчитанное из РЭМ-изображений (см. рис. 3), составляет соответственно 1,40 и 1,72 для игл, полученных в 70 и 75%-ном водном растворе KOH. Аспектное отношение для модели, образованной восемью плоскостями из семейств {311} и {131}, составляет 1,41, для модели, образованной плоскостями из семейств {411} и {141}, составляет 1,77. Это указывает на некоторую неидеальность реальных кремниевых игл.

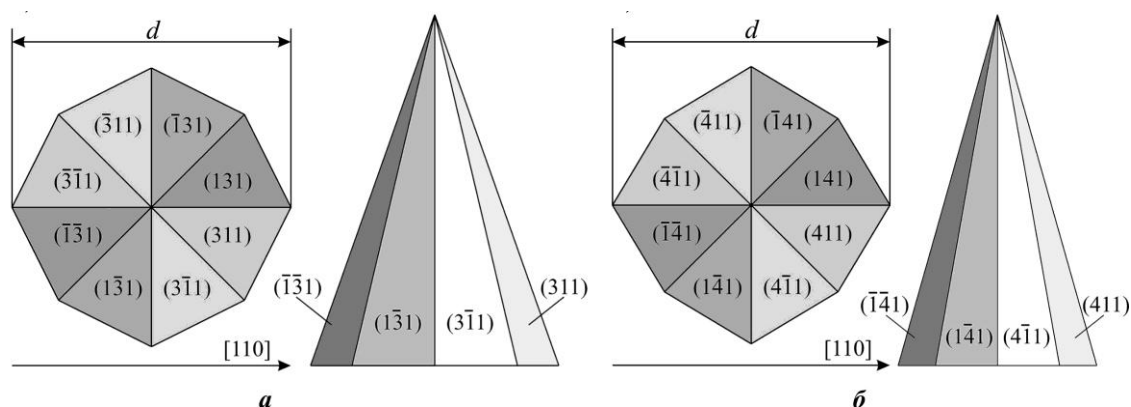


Рис. 5. Модели восьмиугольных кремниевых игл, образованных восемью кристаллографическими плоскостями из семейств {311} и {131} (а) и {411} и {141} (б)

Fig. 5. Models of octagonal silicon needles formed by eight crystallographic planes from the following families: {311} and {131} (a); {411} and {141} (b)

Возможные причины получения игл неправильной формы при малых концентрациях обсуждены в работе [1]. В частности, указываются микромаскирование пузырьками водорода, образующимися во время травления, а также плохая воспроизводимость формы и размеров маски. Для исключения влияния маски в [1] использованы электронно-лучевая литография и процессы сухого травления с целью повышения воспроизводимости формы и размеров маски (ошибка составляет менее 50 нм). Однако и после этого получены неровные иглы с различными видами дефектов. Сделан вывод о том, что основная причина получения игл неправильной формы – микромаскирование пузырьками водорода во время травления. Данный эффект, вероятно, является основной причиной

получения игл неровной формы с «микролезвиями» на вершинах в 30 и 50%-ном водном растворе КОН. Так, время, за которое формируется игла в 30%-ном растворе с использованием круглой маски диаметром 45 мкм, составляет около 6 мин. Для такого непродолжительного времени травления действие эффекта микромаскирования на форму иглы может быть существенным. В работе [16] при практически такой же концентрации водного раствора КОН получены ровные иглы в форме восьмиугольной пирамиды, у которых восьмиугольник в основании образован линиями, перпендикулярными направлениям [210]. Однако размеры квадратной маски, используемой при травлении, значительно больше и равны 1000 мкм, а высота полученных игл составляла около 280 мкм. По-видимому, при формировании игл большого размера, например высотой 280 мкм, влияние эффекта микромаскирования не такое сильное, как при вытравливании игл меньшего размера (высотой 10–15 мкм). При повышении концентрации водного раствора КОН увеличивается время, за которое формируется игла и, соответственно, уменьшается влияние эффекта микромаскирования пузырьками водорода. Иглы, полученные в 50%-ном растворе при травлении в течение 7,5 мин, имеют более правильную форму по сравнению с иглами, полученными в 30%-ном растворе. При больших концентрациях раствора (70 и 75 %) время травления игл более длительное (16–17 мин), т. е. примерно в 2,8 раза больше по сравнению с вытравливанием игл в 30%-ном растворе, а иглы имеют практически идеальную форму.

Помимо уменьшения влияния эффекта микромаскирования с ростом концентрации водного раствора КОН происходит изменение скоростей травления кремния. Причем для определенных кристаллографических направлений скорость травления изменяется по-разному: для одних медленнее, для других быстрее [17]. Так, согласно [17] с повышением концентрации водного раствора КОН скорости травления кремния для направлений [211], [311], [411] уменьшаются по сравнению со скоростями для направлений [221], [331], [441]. При определенной концентрации раствора в процессе формирования островковых структур доминируют грани, соответствующие определенным кристаллографическим плоскостям. Это указывает на то, что для этих направлений скорость травления является при данной концентрации минимальной [17]. Для пирамидальных игл, полученных в 70 и 75%-ном водном растворе КОН, доминирование плоскостей семейства {311}, {131} или {411}, {141}, образующих иглы, говорит о том, что их скорости травления ниже скоростей для других плоскостей, которые могут образовывать иглы. Таким образом, скорость травления в 70%-ном растворе в направлении [311] минимальная, в 75%-ном растворе скорость травления в направлении [411] минимальная по сравнению со скоростями для других направлений.

Заключение. Исследования зависимости формы, размеров и аспектного отношения кремниевых игл пирамидальной формы от концентрации водного раствора КОН в диапазоне 30–75 % при использовании маски в форме круга диаметром 45 мкм и расчет индексов Миллера (hkl) кристаллографических плоскостей, образующих грани иглы, показали следующее.

В процессе травления игл в 70 и 75%-ном водном растворе КОН формируются восьмиугольные пирамиды, сохраняющие свою форму на всей высоте, и все грани, образующие иглу, сходятся в вершину. В процессе травления игл в 30 и 50%-ном водном растворе КОН получаются неровные иглы с различными дефектами и не все грани сходятся в вершину, почти на всех иглах наблюдаются «микролезвия».

Иглы, изготовленные в 75%-ном растворе КОН, имеют наибольшую высоту (≈ 12 – 14 мкм) при исходном размере маски 45 мкм и максимальное аспектное отношение $\approx 1,72$. Форма игл образована восемью плоскостями из семейств {411} и {141}.

Разработанный технологический процесс получения кремниевых игл в 70 и 75%-ном водном растворе КОН позволяет формировать пирамидальные иглы с воспроизводимыми геометрическими параметрами. Преимущество данной технологии заключается в том, что при травлении используется обычная маска в форме круга и не требуется разработка масок, стороны которых специальным образом ориентированы относительно кристаллографического направления [110]. Процессы травления пирамидальных игл в 70 и 75%-ном водном растворе КОН использованы при изготовлении кремниевых кантилеверов для АСМ.

Литература

1. **Burt D. P., Dobson P. S., Donaldson L. A., Weaver J. M. R.** A simple method for high yield fabrication of sharp silicon tips // *Microelectronic Engineering*. 2008. Vol. 85. Iss. 3. P. 625–630. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.11.010>
2. **Li J., Xie J., Xue W., Wu D.** Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications // *Microsyst. Technol.* 2013. Vol. 19. Iss. 2. P. 285–290. <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1622-x>
3. **Новак А. В., Новак В. П., Румянцев А. В.** Особенности процесса изготовления кремниевых игл для кантилеверов // *Изв. вузов. Электроника*. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 234–245. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-234-245>
4. **Новак А. В., Новак В. П.** Оценка влияния размеров зонда на параметры морфологии поверхности пленок кремния с полусферическими зернами, получаемые методом атомно-силовой микроскопии // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. № 9. С. 70–80. <https://doi.org/10.7868/S0207352816090109>
5. **Zhang X., Yu X., Li T., Wang Y.** A novel method to fabricate silicon nanoprobe array with ultra-sharp tip on (111) silicon wafer // *Microsyst. Technol.* 2018. Vol. 24. Iss. 7. P. 2913–2917. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3687-z>
6. **Wolter O., Bayer Th., Greschner J.** Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1991. Vol. 9. Iss. 2. P. 1353–1357. <https://doi.org/10.1116/1.585195>
7. **Brugger J., Buser R. A., De Rooij N. F.** Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1992. Vol. 34. Iss. 3. P. 193–200. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)85002-J](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)85002-J)
8. Formation of silicon tips with <1 nm radius / **R. B. Marcus, T. S. Ravi, T. J. Gmitter et al.** // *Appl. Phys. Lett.* 1990. Vol. 56. Iss. 3. P. 236–238. <https://doi.org/10.1063/1.102841>
9. **Dey R. K., Shen J., Cui B.** Oxidation sharpening of silicon tips in the atmospheric environment // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2017. Vol. 35. Iss. 6. Art. ID: 06GC01. <https://doi.org/10.1116/1.4998561>
10. **He H., Zhang J., Yang J., Yang F.** Silicon tip sharpening based on thermal oxidation technology // *Microsyst. Technol.* 2017. Vol. 23. Iss. 6. P. 1799–1803. <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2941-0>
11. **Hasegawa Y., Yasuda Y., Taniguchi K., Shikida M.** Fabrication method with high-density, high-height microneedle using microindentation method for drug delivery system // *Microsyst. Technol.* 2020. Vol. 26. Iss. 3. P. 765–773. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04571-4>
12. Fabrication of sharp silicon hollow microneedles by deep-reactive ion etching towards minimally invasive diagnostics / **Y. Li, H. Zhang, R. Yang et al.** // *Microsyst. Nanoeng.* 2019. Vol. 5. Art. No. 41. <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0077-y>
13. **Liu J.-H., Betzner T. M., Henderson H. T.** Etching of self-sharpening (338) tips in (100) silicon // *J. Micromech. Microeng.* 1995. Vol. 5. No. 1. P. 18–24. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/5/1/004>
14. Different aspect ratio pyramidal tips obtained by wet etching of (100) and (111) silicon / **D. Resnik, D. Vrtacnik, U. Aljancic et al.** // *Microelectron. J.* 2003. Vol. 34. Iss. 5–8. P. 591–593. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(03\)00056-9](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(03)00056-9)
15. Anisotropic wet etching silicon tips of small opening angle in KOH solution with the additions of I₂/KI / **J. Han, S. Lu, Q. Li et al.** // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2009. Vol. 152. Iss. 1. P. 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.03.008>
16. **Wilke N., Reed M. L., Morrissey A.** The evolution from convex corner undercut towards microneedle formation: Theory and experimental verification // *J. Micromech. Microeng.* 2006. Vol. 16. No. 4. P. 808–814. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/4/018>

17. **Zubel I.** Silicon anisotropic etching in alkaline solutions. III: On the possibility of spatial structures forming in the course of Si (100) anisotropic etching in KOH and KOH+IPA solutions // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2000. Vol. 84. Iss. 1–2. P. 116–125. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00347-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00347-7)

Статья поступила в редакцию 09.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 16.02.2023 г.; принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Новак Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), руководитель лаборатории осаждения АО «Ангстрем» (Россия, 122460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2), Novak@angstrem.ru

Соколов Андрей Максимович – магистрант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-технолог лаборатории осаждения АО «Ангстрем» (Россия, 122460, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 2). SokolovAM@angstrem.ru

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

Новак Виктор Рудольфович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, 4, стр. 3), novak@ntmdt.ru

References

1. Burt D. P., Dobson P. S., Donaldson L. A., Weaver J. M. R. A simple method for high yield fabrication of sharp silicon tips. *Microelectronic Engineering*, 2008, vol. 85, iss. 3, pp. 625–630. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.11.010>
2. Li J., Xie J., Xue W., Wu D. Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications. *Microsyst. Technol.*, 2013, vol. 19, iss. 2, pp. 285–290. <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1622-x>
3. Novak A. V., Novak V. R., Rumyantsev A. V. Features of the manufacturing process of silicon needles for cantilevers. *Russ. Microelectron.*, 2022, vol. 51, iss. 7, pp. 521–527. <https://doi.org/10.1134/S1063739722070071>
4. Novak A. V., Novak V. R. Influence of the probe sizes on the parameters of the surface morphology of hemispherical-grain polysilicon films: Estimation via atomic-force microscopy. *J. Surf. Investig.*, 2016, vol. 10, iss. 5, pp. 949–958. <https://doi.org/10.1134/S1027451016050104>
5. Zhang X., Yu X., Li T., Wang Y. A novel method to fabricate silicon nanoprobe array with ultra-sharp tip on (111) silicon wafer. *Microsyst. Technol.*, 2018, vol. 24, iss. 7, pp. 2913–2917. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3687-z>
6. Wolter O., Bayer Th., Greschner J. Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1991, vol. 9, iss. 2, pp. 1353–1357. <https://doi.org/10.1116/1.585195>
7. Brugger J., Buser R. A., De Rooij N. F. Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1992, vol. 34, iss. 3, pp. 193–200. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)85002-J](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)85002-J)
8. Marcus R. B., Ravi T. S., Gmitter T. J., Chin K., Liu D., Orvis W. J., Ciarlo D. R., Hunt C. E., Trujillo J. Formation of silicon tips with <1 nm radius. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, vol. 56, iss. 3, pp. 236–238. <https://doi.org/10.1063/1.102841>
9. Dey R. K., Shen J., Cui B. Oxidation sharpening of silicon tips in the atmospheric environment. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2017, vol. 35, iss. 6, art. ID: 06GC01. <https://doi.org/10.1116/1.4998561>

10. He H., Zhang J., Yang J., Yang F. Silicon tip sharpening based on thermal oxidation technology. *Microsyst. Technol.*, 2017, vol. 23, iss. 6, pp. 1799–1803. <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2941-0>
11. Hasegawa Y., Yasuda Y., Taniguchi K., Shikida M. Fabrication method with high-density, high-height microneedle using microindentation method for drug delivery system. *Microsyst. Technol.*, 2020, vol. 26, iss. 3, pp. 765–773. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04571-4>
12. Li Y., Zhang H., Yang R., Laffitte Y., Schmill U., Hu W., Kaddoura M., Blondeel E. J. M., Cui B. Fabrication of sharp silicon hollow microneedles by deep-reactive ion etching towards minimally invasive diagnostics. *Microsyst. Nanoeng.*, 2019, vol. 5, art. no. 41. <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0077-y>
13. Liu J.-H., Betzner T. M., Henderson H. T. Etching of self-sharpening (338) tips in (100) silicon. *J. Micromech. Microeng.*, 1995, vol. 5, no. 1, pp. 18–24. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/5/1/004>
14. Resnik D., Vrtacnik D., Aljancic U., Mozek M., Amon S. Different aspect ratio pyramidal tips obtained by wet etching of (100) and (111) silicon. *Microelectron. J.*, 2003, vol. 34, iss. 5–8, pp. 591–593. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(03\)00056-9](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(03)00056-9)
15. Han J., Lu S., Li Q., Li X., Wang J. Anisotropic wet etching silicon tips of small opening angle in KOH solution with the additions of I₂/KI. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, vol. 152, iss. 1, pp. 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.03.008>
16. Wilke N., Reed M. L., Morrissey A. The evolution from convex corner undercut towards microneedle formation: theory and experimental verification. *J. Micromech. Microeng.*, 2006, vol. 16, no. 4, pp. 808–814. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/4/018>
17. Zubel I. Silicon anisotropic etching in alkaline solutions III: On the possibility of spatial structures forming in the course of Si (100) anisotropic etching in KOH and KOH+IPA solutions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 84, iss. 1–2, pp. 116–125. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00347-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00347-7)

The article was submitted 09.12.2022; approved after reviewing 16.02.2022;
accepted for publication 30.03.2023.

Andrey V. Novak – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Head of the Thin Film Deposition Laboratory, “Angstrom” JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 2), Novak@angstrom.ru

Andrey M. Sokolov – Master’s degree student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Process Engineer of the Thin Film Deposition Laboratory, “Angstrom” JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 2), SokolovAM@angstrom.ru

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

Victor R. Novak – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, “NT-MDT Spectrum Instruments” LLC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4, bld. 3), novak@ntmdt.ru

Особенности контроля трехмерного профиля элементов и структур наноразмерных ИС. Обзор

И. В. Нелюбин, М. Г. Путря

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

nelyubin.iv@mail.ru

Аннотация. С переходом в область критических размеров менее 100 нм двумерные (планарные) формы структур элементов, изготавливаемых в процессе технологического цикла, изменяются на трехмерные сложные формы. Это различные затворные структуры МОП-транзисторов, оксидные и нитридные маски для фотолитографии, транзисторы с «плавниковым» затвором (FinFET), транзисторы с опоясывающим затвором (GAA-FET) и др. Контроль технологических процессов, помимо требований к критическим размерам элементов в плоскости, включает в себя также требования к прецизионности измерений полного профиля. Несмотря на широкое разнообразие разработанных в настоящее время методов измерений линейных размеров и профиля поверхности, не все из них можно использовать для контроля трехмерного профиля изготавливаемых структур. В работе на основе анализа литературных данных показаны особенности широко используемых в настоящее время методов измерений линейных размеров и элементов топологии, выявлены проблемы их применения для контроля трехмерного профиля. Рассмотрены перспективные методики контроля, внедряемые в настоящее время при производстве ИС.

Ключевые слова: контроль технологических процессов, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, скаттерометрия, критические размеры

Для цитирования: Нелюбин И. В., Путря М. Г. Особенности контроля трехмерного профиля элементов и структур наноразмерных ИС. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 298–325. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-298-325>. – EDN: UXRFJC.

Review article

Features of three-dimensional profile control of elements and structures of nanoscaled ICs. Review

I. V. Nelyubin, M. G. Putrya

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

nelyubin.iv@mail.ru

Abstract. With the IC elements transition to critical size region of less than 100 nm, two-dimensional shapes of element structures manufactured during fabrication cycle are changed to three-dimensional complex shapes. These are different gate structures of MOS transistors, oxide and nitride photolithography masks, “fin” gate transistors (FinFET), gate-all-around transistors (GAAFET) and others. Process validation, besides requirements to critical sizes of elements in the two-dimensional plane, also includes requirements to precision of full profile measurements. Despite the wide variety of currently developed linear dimensions and surface profile measurement techniques, not all of them can be applied to three-dimensional profile control of fabricated structures. In this work, based on literature data analysis the features of widely used techniques for measurement of linear sizes and topology elements are displayed, and the difficulties in employing them to control a three-dimensional profile are elicited. The promising measurement techniques currently being introduced in the IC fabrication have been considered.

Keywords: process control, scanning electron microscopy, SEM, transmission electron microscopy, TEM, atomic force microscopy, AFM, scatterometry, critical dimensions

For citation: Nelyubin I. V., Putrya M. G. Features of three-dimensional profile control of elements and structures of nanoscaled ICs. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 298–325. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-298-325>. – EDN: UXRFJC.

Введение. Уменьшение линейных размеров элементов ИС ведет к одновременному увеличению степени интеграции, росту быстродействия и производительности, а также к снижению потребляемой мощности ИС. В настоящее время размеры элементов, изготавливаемых на кремниевых подложках, составляют менее 10 нм. При этом также происходят изменения в конструкции полупроводниковых приборах. Некоторые двумерные (планарные) элементы и структуры в процессе изготовления изменяются на трехмерные (объемные), например затворы FinFET-транзисторов имеют четко выраженную трехмерную форму [1]. Примеры трехмерных элементов и структур, изготавливаемых в технологических процессах микроэлектроники, приведены на рис. 1. Отметим, что в данном случае обозначение «трехмерный» применимо именно в конструктивном смысле, т. е. когда вертикальные размеры структуры сопоставимы с размерами по горизонтали, поскольку физически все структуры планарной технологии также являются трехмерными.

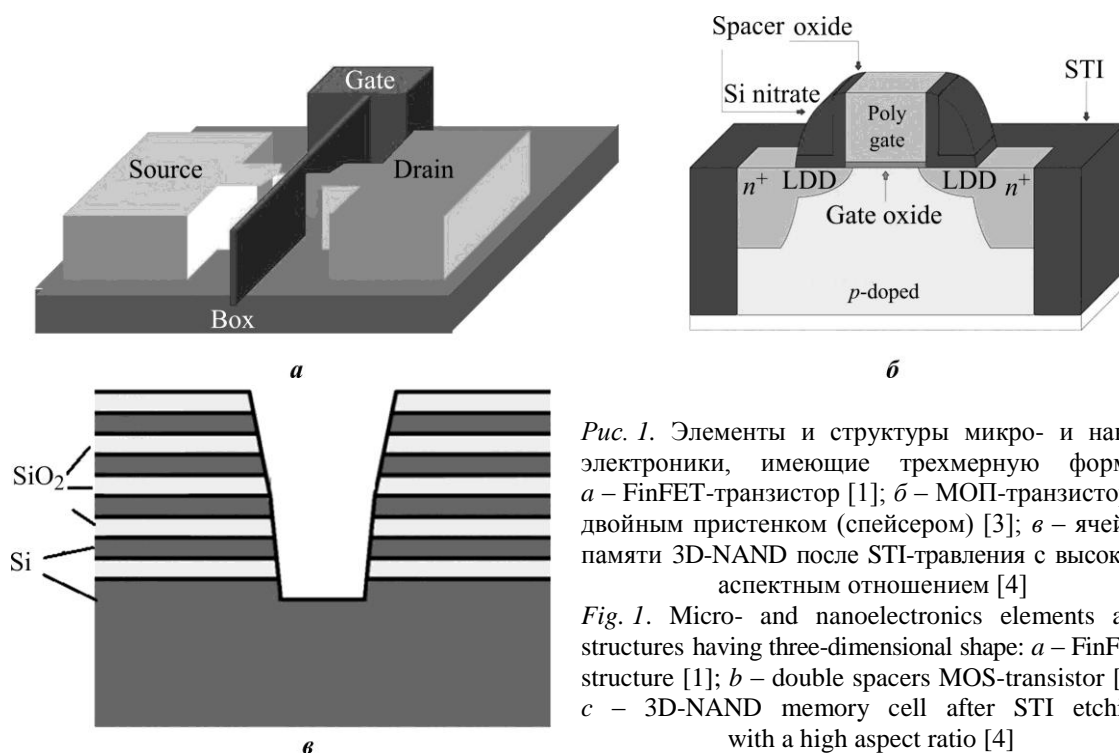


Рис. 1. Элементы и структуры микро- и наноэлектроники, имеющие трехмерную форму: *a* – FinFET-транзистор [1]; *б* – МОП-транзистор с двойным пристенком (спейсером) [3]; *в* – ячейка памяти 3D-NAND после STI-травления с высоким аспектным отношением [4]

Fig. 1. Micro- and nanoelectronics elements and structures having three-dimensional shape: *a* – FinFET structure [1]; *b* – double spacers MOS-transistor [3]; *c* – 3D-NAND memory cell after STI etching with a high aspect ratio [4]

Для обеспечения эффективного развития, сопровождения технологии и высокого процента выхода годных изделий в первую очередь должны быть реализованы подходящие метрологические, или измерительные, системы контроля технологических процессов [2]. При производстве ИС все средства контроля включены в систему межоперационного контроля технологических процессов, который подразумевает организацию контрольных измерений на всех этапах технологического маршрута (после каждой проведенной технологической операции) и направлен на выявление дефектов, ошибок проектирования, отклонений линейных размеров и прочих несовершенств. С точки зрения организации процесса контроля измерительные методики должны отвечать следующими требованиями:

- высокая точность и воспроизводимость результата измерений;
- высокая степень достоверности результата;
- высокая производительность;
- оперативность получения результата, автоматизация процессов измерений и обработки полученных результатов;
- неразрушающий характер воздействия на объект измерения [5].

Наиболее важными параметрами, которые необходимо контролировать в процессе изготовления элементов ИС, являются их линейные, или критические, размеры (Critical Dimensions, CD). Размеры структур, в том числе в вертикальной плоскости, в значительной степени связаны с надежностью и отказоустойчивостью ИС. Например, в КМОП-технологии уровня 130 нм аспектное отношение составляет больше единицы. При такой структуре затвора существенное значение имеет угол наклона стенки затвора. Если в технологическом процессе наклон боковой стенки изменился на единицу, это может вызвать изменения наблюдаемых критических размеров (при измерениях по низу и верху) более чем на 10 %. Такое изменение может выходить за рамки допустимых отклонений процесса и, соответственно, приводить к снижению выхода годных изделий, поэтому его нужно контролировать. Необходимо корректно определять, на каком

положении по высоте происходит операция контроля критического размера: по верху, низу или середине, т. е. необходимо проводить измерения трехмерного профиля исследуемой структуры [6]. К параметрам полного профиля структуры обычно относят латеральные размеры (по верху, низу и середине), толщину (высоту), углы наклона боковых стенок, закругления углов (рис. 2), а также шероховатости линии по ширине (Line Width Roughness, LWR) и шероховатости по краю (Line Edge Roughness, LER).

Для контроля линейных размеров в полупроводниковой промышленности в течение длительного времени успешно использовали методы оптических измерений на основе анализа изображений, в частности методы оптической микроскопии, конфокальной сканирующей микроскопии и т. д. Эти методы характеризуются высоким быстродействием и неразрушающим воздействием на образец. В процессе развития технологий микроэлектроники и масштабирования размеров топологических элементов стали использовать методы растровой электронной микроскопии, поскольку оптическая микроскопия не могла обеспечить требуемую разрешающую способность. Растровый электронный микроскоп (РЭМ) применяется в основном для контроля планарных структур (вид сверху). Для измерений вертикальных размеров используются методы растровой электронной микроскопии поперечного сечения и просвечивающей электронной микроскопии, для которых необходимо готовить поперечное сечение образца (скол), что является разрушающим методом подготовки [8]. В связи с этим контроль вертикальных размеров характеризуется малым объемом выборки. Еще одним методом измерения вертикальных размеров, а также шероховатости границ раздела является атомно-силовая микроскопия, которая отличается более низким быстродействием (по сравнению с растровой электронной микроскопией), а также низкой воспроизводимостью полученных результатов, поскольку они характеризуются зависимостью от геометрических параметров кантилевера, изменяемых со временем. Несмотря на то что данные методики разработаны достаточно давно и для каждой из них существует коммерчески доступное высокоточное оборудование (контроль вплоть до атомарного уровня), они не всегда пригодны для использования в качестве систем контроля трехмерных профилей структур в процессе производственного цикла.

В настоящей работе рассматриваются особенности применения широко используемых на сегодняшний день методов измерения линейных размеров, таких как растровая и просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, а также проблемы их применения при измерениях трехмерных профилей некоторых структур. Представлены применяемые перспективные методики контроля элементов и структур наноразмерных ИС.



Рис. 2. Типичная структура элемента линии фоторезистивной маски и ее геометрические параметры: КР – критический размер (в данном случае ширина линии); «футинг» – закругление угла по низу; «раундинг» – закругление угла по верху [7]

Fig. 2. Typical structure of a line photoresistive mask element and its geometric sizes: КР – critical dimensions (the line width in this case); “footing” and “rounding” – curvature of the bottom and top corner respectively [7]

Электронная микроскопия. Классическим методом контроля латеральных размеров элементов топологии ИС является электронная микроскопия в ее различных вариациях (сканирующая, просвечивающая). Для контроля критических размеров объектов микроэлектроники используется РЭМ, так как имеет большую глубину фокусировки (около 100 мкм), большой диапазон увеличений (более 100 000), высокую разрешающую способность и разные режимы работы [9]. Изображение образца создается путем сканирования поверхности сфокусированным пучком электронов, при котором он облучает каждую точку образца и последовательно перемещается по его поверхности. Взаимодействие электронов с поверхностью исследуемого образца приводит к возникновению различных ответных сигналов: оже-электронов, отраженных и вторичных электронов, рентгеновского излучения и др. Эти сигналы регистрируются детекторами и дают информацию о топографии поверхности и составе образца. Формирование электронного пучка должно происходить в вакууме, так как иначе пучок электронов будет рассеиваться на молекулах воздуха и не долетит до образца.

В технологическом цикле производства РЭМ используется в основном для контроля результатов проведения процессов фотолитографии и травления. Как правило, для этого применяются специальные автоматизированные измерительные микроскопы, называемые CD-SEM (Critical Dimension Scanning Electron Microscopy). Сигнал, используемый для построения изображения в CD-SEM, формируется в основном за счет обратноотраженных и вторичных электронов. Вторичные электроны имеют относительно низкую энергию (менее 50 мэВ), в то время как обратноотраженные – относительно высокую (более 50 мэВ). Вторичные электроны несут информацию о топологии поверхности, а отраженные – о химическом составе и морфологии. Разрешение типичного микроскопа CD-SEM составляет 1–2 нм [10].

Главное преимущество использования CD-SEM заключается в том, что это прямой метод измерения и проводить анализ довольно легко, когда сформировано и сохранено изображение. Однако этот метод не удовлетворяет требованиям для проведения трехмерных измерений, в частности нельзя измерить затрав под маску или высоту канавки. Техника наклона электронного луча может позволить проводить вертикальные измерения, но точность при таких измерениях может снизиться [10]. Кроме того, взаимодействие электронов пучка с некоторыми материалами на кремниевой подложке может приводить к повреждениям этих материалов. Особенно чувствительны к такому воздействию фоторезисты, для контроля которых требуется избегать повторных измерений [10].

Рассмотрим некоторые особенности измерений линейных размеров фоторезистивных масок. Известно, что в каждом новом поколении процессов фотолитографии создаются и применяются новые фоторезисты. С началом использования KrF- и ArF-литографии с длиной волны экспонирования 248 и 193 нм соответственно стали применяться химически усиленные фоторезисты. Использование таких фоторезистов проблематично для измерений с помощью РЭМ из-за эффекта «сгорания» фоторезиста, заключающегося в уменьшении ширины линии фоторезиста после ее экспозиции электронным пучком [11]. Данный эффект показан на РЭМ-изображениях на рис. 3. На рис. 4 показана типичная зависимость, отражающая изменение критического размера фоторезиста от количества измерений методом РЭМ.

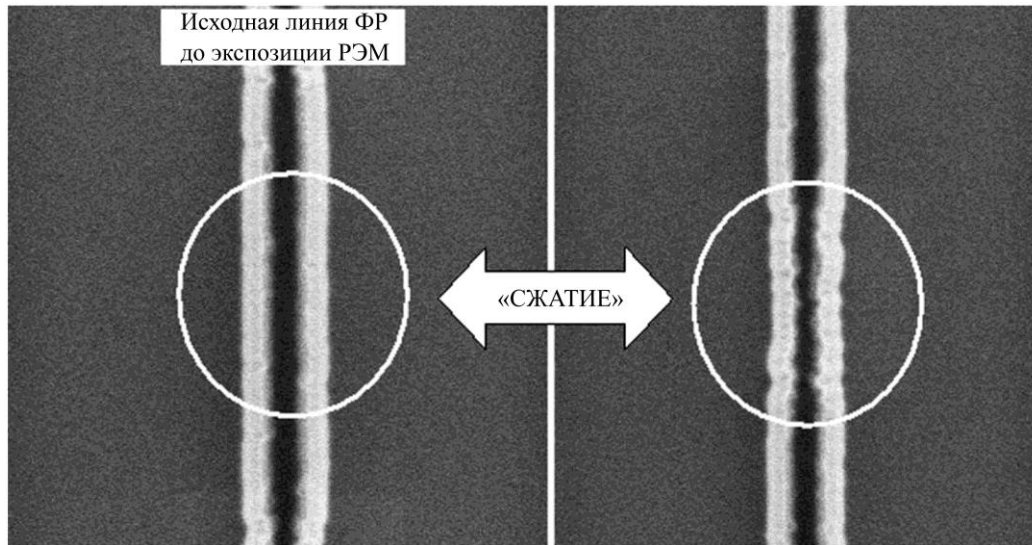


Рис. 3. РЭМ-изображения линии фоторезиста (ФР) после травления до измерения РЭМ (слева) и после (справа) [12]

Fig. 3. SEM images of the etching photoresist (ФР) line before SEM measurements (left) and after (right) [12]

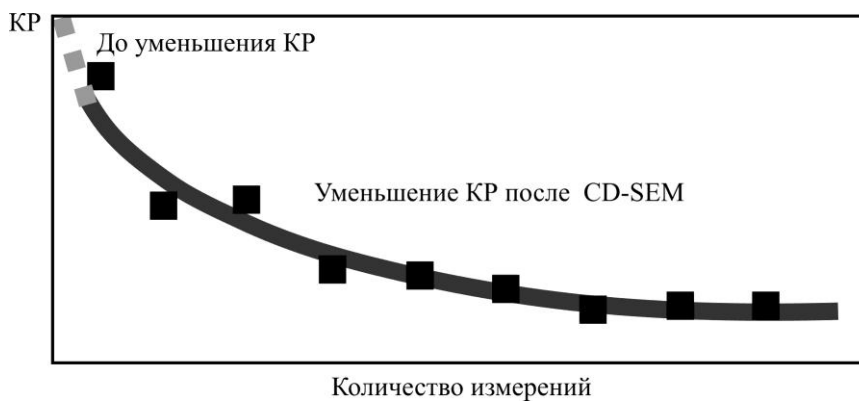


Рис. 4. Зависимость уменьшения критического размера линии ArF-резиста от количества измерений методом РЭМ, отражающая эффект сгорания фоторезиста [11]

Fig. 4. Dependence of the decrease in the line size of ArFresist on the number of measurements, showing the photoresist shrinkage effect [11]

В работе [13] эффект сгорания фоторезистов изучен более детально. Авторы исследовали изменения, происходящие при многократных CD-SEM-измерениях параметров элементов фоторезистивной маски, используемых в фотолитографических процессах производства устройств с суб-100-нм размерами (позитивные химически усиленные резисты для ArF-литографии). При этом выбраны три резиста: гибридный сополимер метакрилата циклических олефинов и малеинового ангидрида, сополимер метакрилата и терполимер метакрилата. Исследуемые образцы – это линии проявленного фоторезиста шириной 130 нм и пробелами между линиями такой же ширины. Параметры электронного микроскопа оставались неизменными для измерений всех групп образцов во время исследования: ускоряющее напряжение 800 В, ток пучка 8 пА, увеличение 150 000 \times . На рис. 5 показано сужение ширины линий ArF-резиста при CD-SEM-измерениях. Видно, что при повторных измерениях критический размер значительно уменьшается, вплоть до значений 12–14 нм (до 10 % от исходного значения). Для технологий уровня 90 нм и менее такие изменения критических размеров могут оказаться недопустимыми.

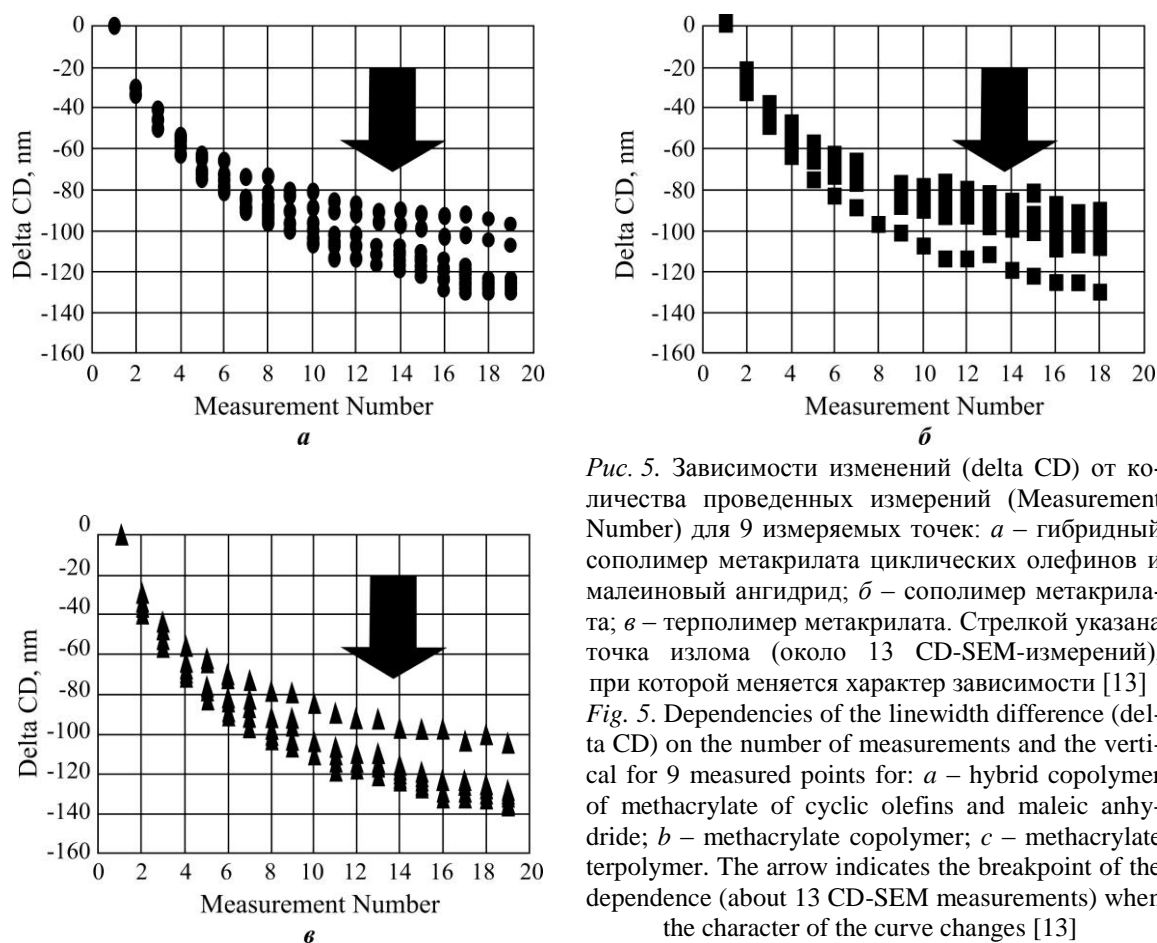


Рис. 5. Зависимости изменений (delta CD) от количества проведенных измерений (Measurement Number) для 9 измеряемых точек: а – гибридный сополимер метакрилата циклических олефинов и малеиновый ангидрид; б – сополимер метакрилата; в – терполимер метакрилата. Стрелкой указана точка излома (около 13 CD-SEM-измерений), при которой меняется характер зависимости [13]

Fig. 5. Dependencies of the linewidth difference (delta CD) on the number of measurements and the vertical for 9 measured points for: a – hybrid copolymer of methacrylate of cyclic olefins and maleic anhydride; b – methacrylate copolymer; c – methacrylate terpolymer. The arrow indicates the breakpoint of the dependence (about 13 CD-SEM measurements) when the character of the curve changes [13]

Механизм сгорания фоторезиста авторы работы [3] объясняют разложением групп $-\text{COOH}$ в составе цепочки полимера фоторезиста, а также выделением молекул газа CO_2 в результате взаимодействия электронов с фоторезистом. Предлагается несколько способов минимизации данного эффекта: уменьшение степени воздействия (экспозиции) электронного пучка на образец с помощью уменьшения ускоряющего напряжения или тока пучка, использования систем стабилизации электронного пучка и др. В настоящее время предложено несколько механизмов, объясняющих данный эффект [11–13]. Некоторые авторы сообщают о значительной минимизации сгорания фоторезиста при использовании РЭМ с ультранизким ускоряющим напряжением, при котором энергия электронов падающего пучка составляет 100–200 эВ [14–16]. Также известно, что зарядка образца играет важную роль для РЭМ-измерений, особенно если на пластине присутствуют диэлектрические слои. Зарядка имеет динамический характер (величина заряда меняется со временем) и вносит ошибку в результаты измерений критических размеров [17]. Обычно зарядку образцов можно наблюдать по изменению контраста на изображениях РЭМ.

РЭМ используется для контроля латеральных размеров при «виде сверху». Для измерений структур под углом или сбоку необходимо проводить дополнительную подготовку образца (скол) и использовать РЭМ поперечного сечения. Использование данной методики требует разрушения образца. В работе [18] авторы сообщают о разработке технологии специальной конструкции РЭМ для трехмерных измерений – технологии мультисканального детектирования. В конфигурацию электронной колонны такого РЭМ (рис. 6) добавлены дополнительные детекторы вторичных электронов (Multi Vision

Metrology). Такая система позволяет быстро и неразрушающим образом получить информацию о выпуклых и вогнутых поверхностях наноразмерных структур, таких как, например, затвор FinFET-транзистора. Результаты измерений, в том числе угла наклона боковых стенок, хорошо коррелируют с данными атомно-силового микроскопа (АСМ).

Существует также направление исследований с применением РЭМ с системой поворота электронного пучка на определенный угол (tilt CD-SEM). В таких системах возможен наклон луча за счет магнитной отклоняющей системы электронной колонны. При косом падении пучка на боковую стенку структуры будет падать больше электронов, чем при прямом падении, это увеличит количество выходящих вторичных электронов, что, в свою очередь, увеличит сигнал на детекторе и даст больше полезной информации (рис. 7). Таким образом можно точнее определять шероховатость вертикальных стенок.

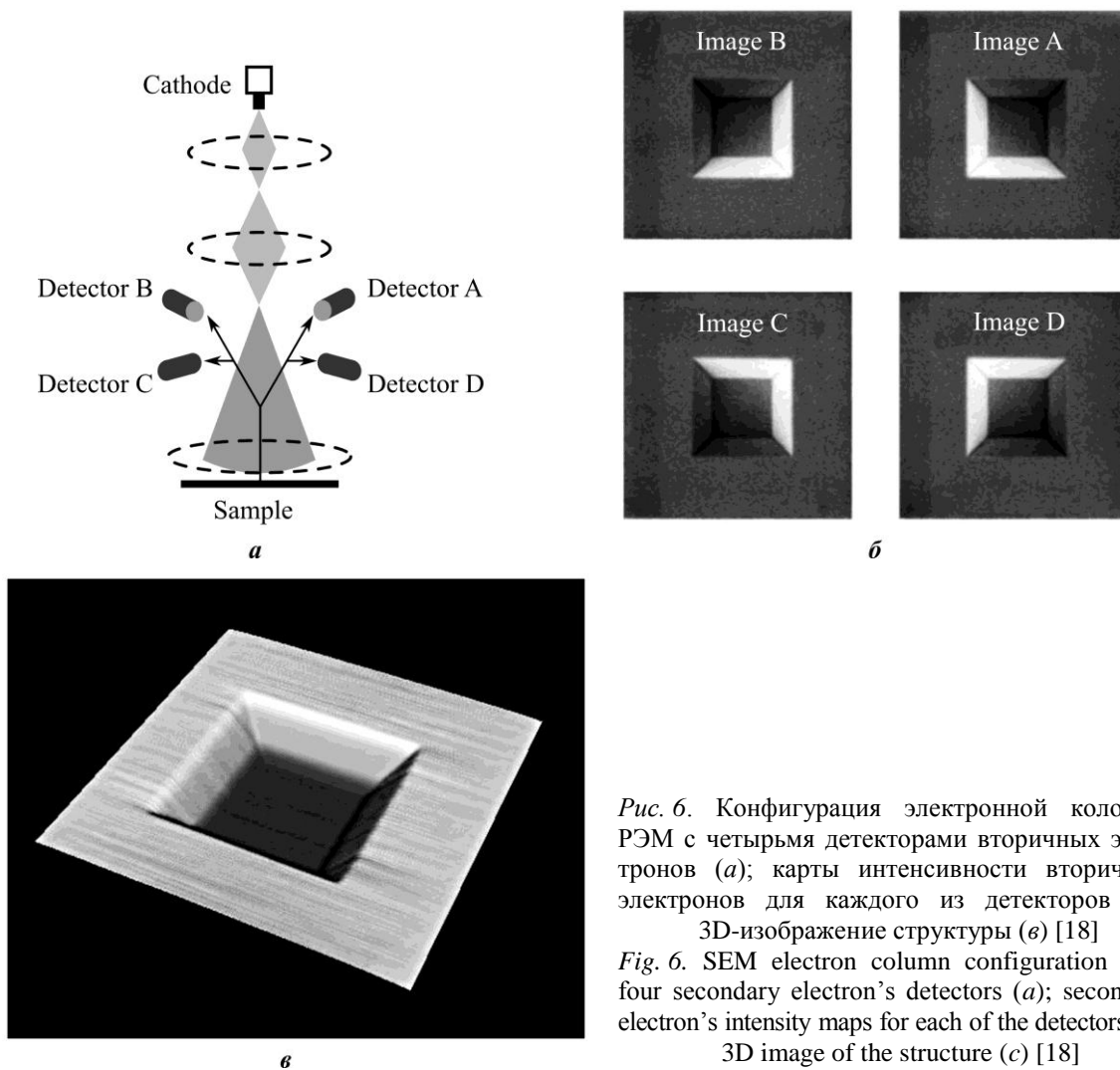


Рис. 6. Конфигурация электронной колонны РЭМ с четырьмя детекторами вторичных электронов (а); карты интенсивности вторичных электронов для каждого из детекторов (б); 3D-изображение структуры (в) [18]

Fig. 6. SEM electron column configuration with four secondary electron's detectors (a); secondary electron's intensity maps for each of the detectors (b); 3D image of the structure (c) [18]

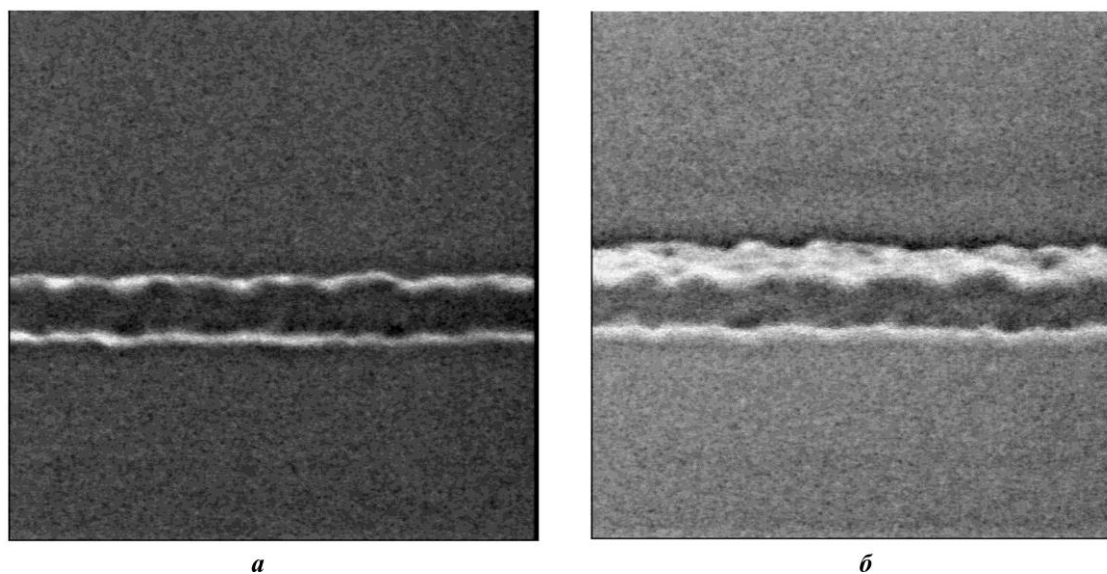


Рис. 7. РЭМ-изображения линий ArF-фоторезиста: *a* – без наклона (вид сверху);
b – с наклоном электронного луча на 6° [19]
Fig. 7. SEM images of the ArF resist lines: *a* – without tilt (top view);
b – with an electron beam tilt by 6 degrees [19]

В работе [20] авторы сообщают о разработке методики реконструкции полного профиля структуры с помощью tilt CD-SEM. Для этого используется РЭМ с возможностью отклонения луча на максимальный угол, равный 15° . С двух разных углов наклона луча (3 и 15°) проводится реконструкция боковых поверхностей линий фоторезиста. Показано, что данная методика позволяет значительно сократить временные затраты на поиск и устранение проблем технологических процессов на этапе разработки процессов. Скола образца в данном случае не требуется.

Таким образом, растровая электронная микроскопия имеет ряд специфических недостатков и ограничений, которые особенно проявляются в нанометровом диапазоне измерений [9]:

- сложность получения трехмерных изображений поверхности, обусловленная тем, что высота рельефа в РЭМ определяется по эффективности упругого и неупругого рассеяния электронов и зависит от глубины проникновения первичных электронов в приповерхностные слои;
- возможность повреждения изучаемых образцов высокоэнергетичным сфокусированным электронным пучком;
- необходимость осаждения дополнительных токоснимающих слоев на диэлектрические поверхности для предотвращения эффекта накопления заряда;
- необходимость создания условий высокого вакуума для проведения измерений.

Следует отметить также высокую стоимость оборудования для РЭМ. Дорогостоящими и сложными также являются обслуживание и ремонт установок, в том числе промышленных. Производительность операций контроля промышленных CD-SEM таких производителей, как Hitachi, KLA-Tencor, составляет 40–65 пластин в час [21, 22] при измерении 6–10 точек на пластину.

Просвечивающая электронная микроскопия. Метод просвечивающей электронной микроскопии отличается от метода растровой электронной микроскопии тем, что электронный пучок просвечивает образец насквозь, а неравномерное поглощение электронов разными участками или материалами образца формирует двумерную картину

распределения плотности прошедшего потока электронов. В основном в полупроводниковой промышленности используются просвечивающие электронные микроскопы (ПЭМ) высокого разрешения и ПЭМ с высокоугловым кольцевым темнопольным детектором (рис. 8). Изображение в высокоразрешающем ПЭМ формируется интерференционными картинками от дифрагированных и прошедших электронов от падающего пучка, освещающего исследуемую область образца. В ПЭМ с высокоугловым кольцевым детектором сфокусированный электронный пучок сканирует область исследования поточечно. Рассеянные от атомов образца электроны обнаруживаются кольцевым детектором, интенсивность излучения на котором либо пропорциональна резерфордскому сечению рассеяния, либо монотонна в соответствии с атомным номером, что наблюдается реже [23].

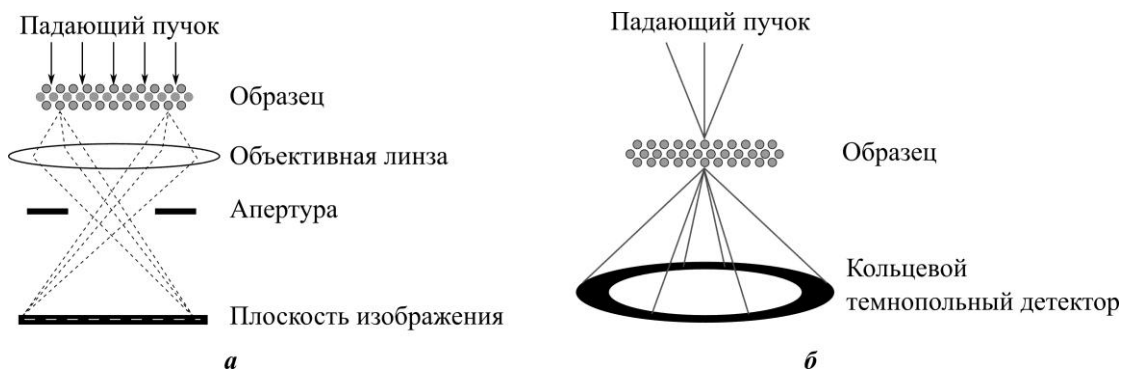


Рис. 8. Схематические изображения ПЭМ: а – высокоразрешающего; б – с высокоугловым кольцевым темнопольным детектором [23]

Fig. 8. Schematic TEM representation: a – high resolution; b – with high-angle annular darkfield detector [23]

Разрешение современных ПЭМ может достигать 0,05 нм [23], и такого разрешения достаточно для исследования дву- и трехмерных структур, в том числе на атомарном уровне, для анализа поверхности и т. д. (рис. 9). Полное поперечное сечение транзисторов с опоясывающим затвором – GAA-транзисторов – с высоким разрешением также может быть получено с помощью ПЭМ.

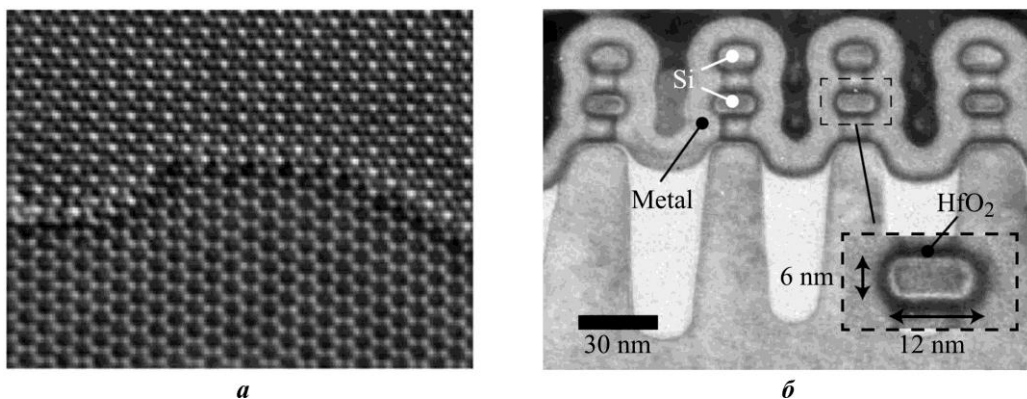


Рис. 9. Изображения, полученные с помощью высокоразрешающего ПЭМ: а – двумерная структура графена; б – поперечное сечение GAA-транзисторов [23]

Fig. 9. Images obtained by high resolution TEM: a – two-dimensional structure of graphene; b – cross-section of GAA transistors [23]

Для суб-10-нм технологий разрешение РЭМ оказалось недостаточным, что привело к созданию установок CD-ТЕМ (Critical Dimensions Transient Electron Microscopy) и CD-AFM (Critical Dimensions Atomic-Force Microscopy), несмотря на их низкую скорость работы. В таких установках возможна комбинация применения ПЭМ и техники фокусированного ионного пучка, которая позволяет проводить контроль размеров ультратонких образцов в дву- и трехмерной плоскостях [23].

В настоящее время метод просвечивающей электронной микроскопии признается «золотым стандартом» эталонных измерений и точности получаемых результатов. Однако длительный цикл подготовки образца к исследованию и низкая пропускная способность отрицательно характеризуют данный метод для приложений контроля производственных процессов [24].

Атомно-силовая микроскопия. Метод атомно-силовой микроскопии поверхности был предложен в 1982 г. [25] и описан на основе эффекта ван-дер-ваальсового взаимодействия близко расположенных твердых тел. Типичная схема устройства атомно-силового микроскопа представлена на рис. 10. Ключевым элементом любого атомно-силового микроскопа является кантилевер, на конце которого находится острие с радиусом несколько нанометров. Пьезоэлектрический элемент приводит в движение кантилевер и подводит его к поверхности образца на расстояние 0,1–10 нм. На таком расстоянии между острием кантилевера и поверхностью возникает межатомное (межмолекулярное) взаимодействие. Пока острие кантилевера остается вблизи поверхности, а образец перемещается (сканируется) в плоскости X-Y, при изменении рельефа поверхности образца будет меняться отклонение кантилевера. Все эти отклонения регистрируются емкостными или оптическими (фотодиодами) датчиками и преобразуют их в электрические сигналы. Отклонение по высоте регулируется системой обратной связи манипулятора (пьезосканера) различным образом в зависимости от выбранного режима работы микроскопа – режима постоянной силы или постоянной высоты. Регистрация изменения положения кантилевера по трем координатам позволяет получить трехмерное изображение поверхности. В отличие от РЭМ АСМ позволяет проводить измерения не только в вакууме, но и в других условиях (атмосферный воздух, жидкости).

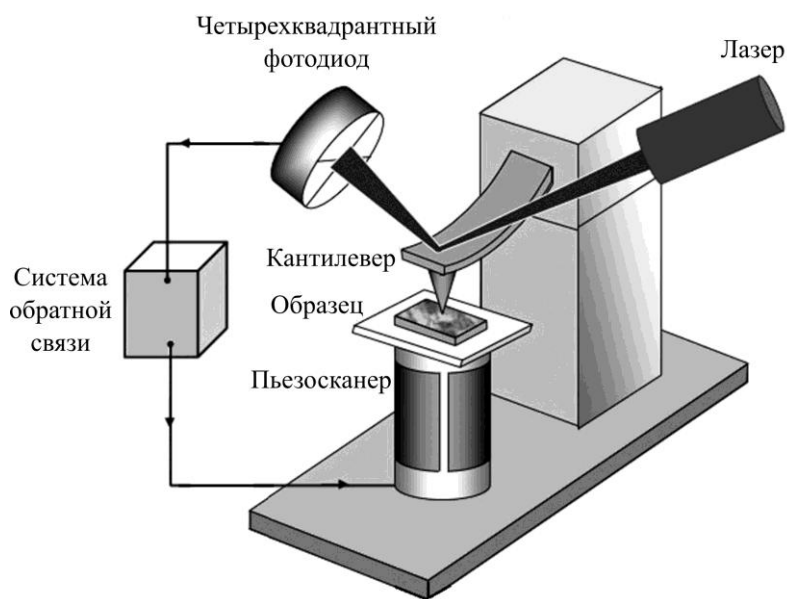


Рис. 10. Схема устройства атомно-силового микроскопа [26]
Fig. 10. Scheme of the atomic-force microscope [26]

Основное применение АСМ – измерение высоты структур (толщины), в частности высоты ступенек, высоты перепадов толщины после химико-механической полировки, глубины канавок и т. д. [27]. Также АСМ широко используется для измерений шероховатости поверхностей различных осажденных слоев. Пространственное разрешение в АСМ определяется диаметром зонда, его формой, отношением длины к ширине и амплитудой колебаний при полуконтактном режиме сканирования [28]. На рис. 11 отражены возможные артефакты построения профиля исследуемой структуры для зондов с разными формами и аспектным отношением.

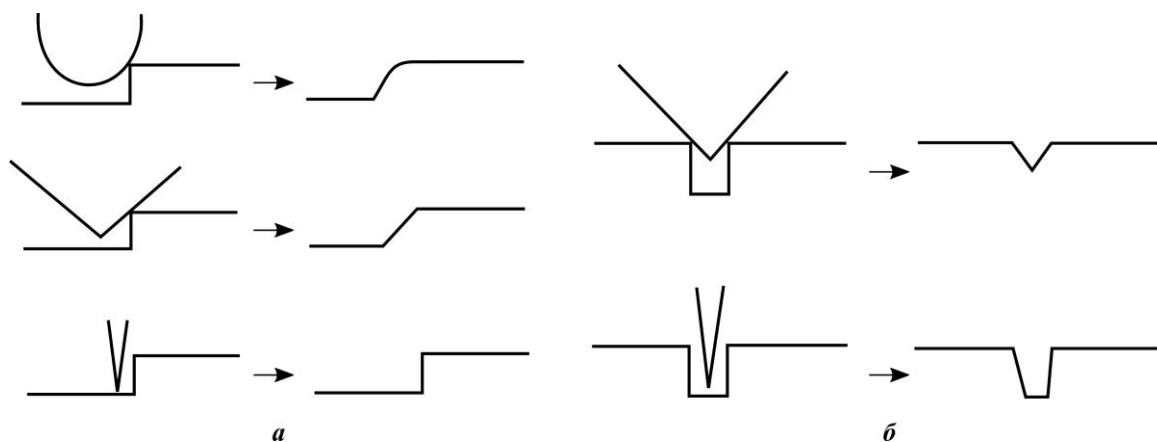


Рис. 11. Отображение особенностей АСМ-измерений различных структур: а – ступенек; б – канавок
Fig. 11. Features of the AFM measurements for different pieces: a – steps; b – trenches

Отметим, что до недавнего времени существовали особые требования к высоте исследуемых элементов (не более 100 нм), а также к расстоянию до соседнего элемента (не ближе чем 100 нм). Эти требования существенно ограничивали возможности применения АСМ для исследования структур современных ИС, высота которых может составлять от 0,1 до 1 мкм и более [9]. Таких ограничений возможно избежать с помощью специально разработанных зондов для АСМ, позволяющих проводить измерения структур глубиной более 1 мкм и снижающих «мертвую зону» в острых углах. Эти зонды имеют наконечники в виде вискеров [29–31], углеродных нанотрубок [32] и др. Визуализация дна глубокой канавки (~ 1,5 мкм), полученная с помощью АСМ с зондом с нановискером из ZnO, показана на рис. 12. Радиус кривизны таких зондов составляет менее 10 нм, угол конуса 1–2°, длина острия 5–30 мкм [30].

В последнее время АСМ применяется для измерений и визуализации боковых стенок. Это одно из самых сложных приложений для АСМ. Так же как шероховатость поверхности тонких пленок, шероховатость боковой стенки становится важной для функциональности и корректной работы наноразмерных устройств. За последние несколько лет АСМ стал мощным инструментом для точного измерения критических размеров. Однако, поскольку большинство атомно-силовых микроскопов работают в режиме измерения сверху вниз, они имеют ограниченный доступ к боковой стенке, что особенно проявляется при измерении структур с углом стенки 90° и более. Чтобы преодолеть это ограничение, разработаны специальные зонды воронкообразной формы или в форме ступни (boot shaped tips) (рис. 13) [33].

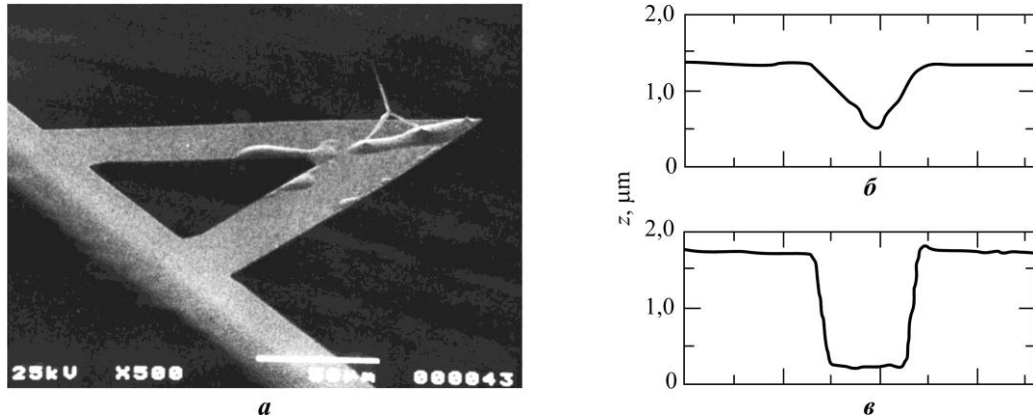


Рис. 12. СЭМ-изображение кантилевера с ZnO-вискером (а) [30]; АСМ-профиль канавки SiO₂ глубиной 1,5 мкм, полученный с зондом пирамидальной формы из Si₃N₄ (б) и зондом с ZnO-вискером (в) [31]

Fig. 12. SEM images of a cantilever with a ZnO whisker (a) [30]; AFM profile of a SiO₂ tranche 1.5 um deep obtained with Si₃N₄ pyramidal probe (b) and ZnO whisker probe (c) [31]

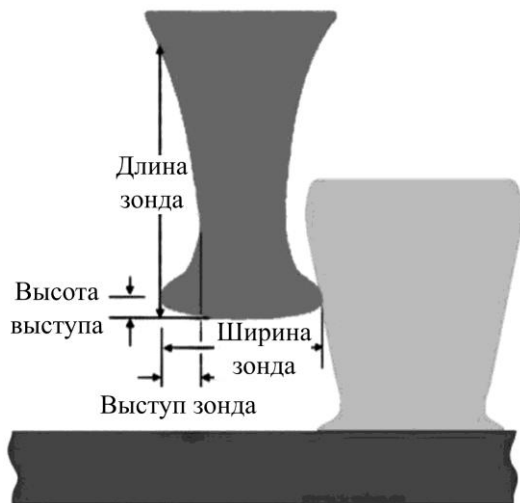


Рис. 13. Форма и параметры воронкообразного АСМ-зонда для контроля элементов с острым углом боковой стенки [28]

Fig. 13. The shape and parameters of a boot-shaped AFM probe for acute angle of element sidewall control [28]

Воронкообразные зонды используются в CD-AFM-установках, адаптированных под измерения критических размеров трехмерных структур в производственных процессах. Данные микроскопы дают возможность всесторонне исследовать форму и размеры трехмерных объектов с высокой достоверностью и являются универсальными метрологическими инструментами. Широкое распространение таких приборов сдерживается в основном сложностью эксплуатации, низкой производительностью, а также высокой стоимостью операции измерения [27].

В работе [33] продемонстрированы результаты измерений параметров микро- и наноструктур с использованием специально разработанного 3D-АСМ, работа которого основана на использовании двух независимых сканирующих систем (XY-сканер и Z-сканер). XY-сканер перемещает образец только в плоскости X–Y и не зависит от направления оси Z. Z-сканер приводится в действие отдельным пьезоэлементом, который перемещает зонд только в направлении Z. Такой сканер позволяет намеренно наклонять зонд для облегчения доступа к боковой стенке. При этом возможны измерения в верхней, средней и нижней частях структуры, а также измерения шероховатости вдоль боковой стенки линии. На рис. 14 представлены результаты измерения линий фоторезиста (с шириной линий и пробелом между ними 165 нм) с помощью РЭМ поперечного сечения и АСМ.

Воронкообразные зонды используются в CD-AFM-установках, адаптированных под измерения критических размеров трехмерных структур в производственных процессах. Данные микроскопы дают возможность всесторонне исследовать форму и размеры трехмерных объектов с высокой достоверностью и являются универсальными метрологическими инструментами. Широкое распространение таких приборов сдерживается в основном сложностью эксплуатации, низкой производительностью, а также высокой стоимостью операции измерения [27].

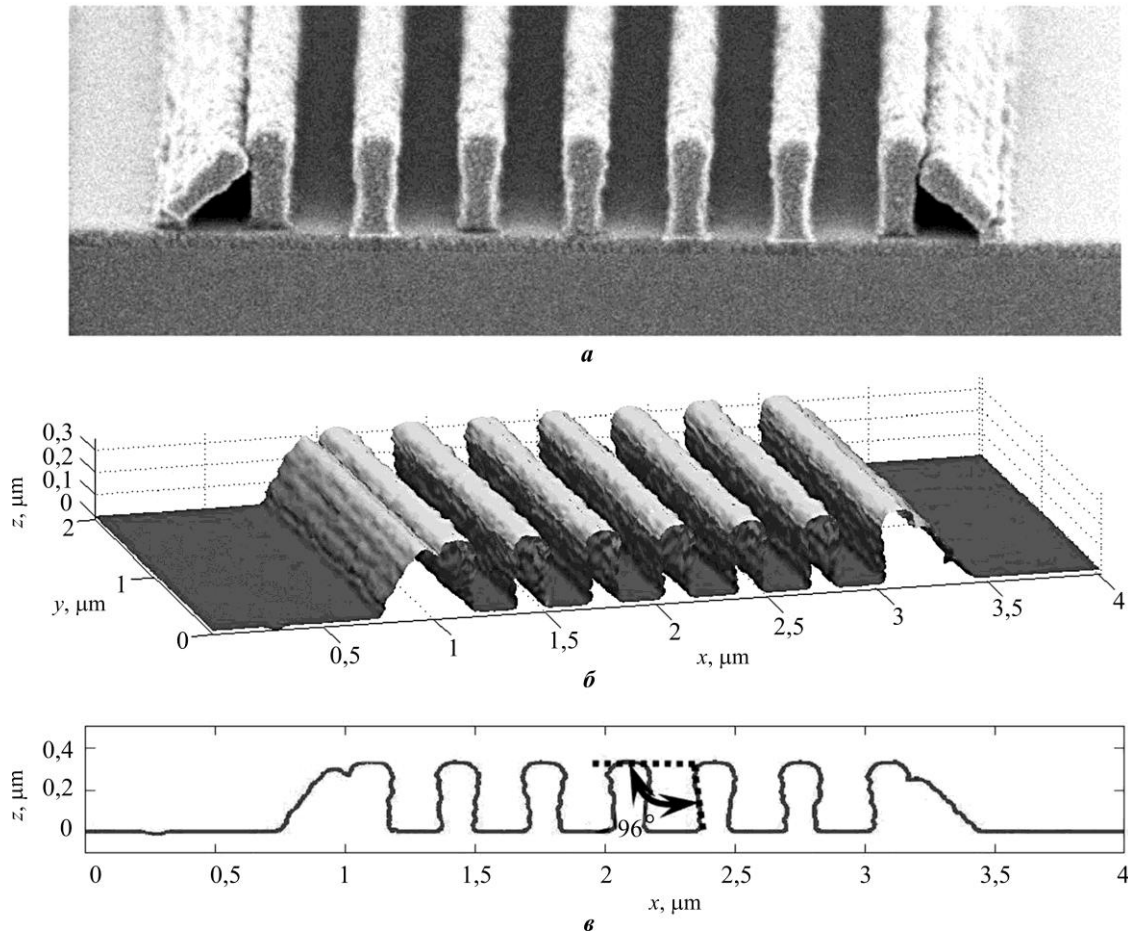


Рис. 14. Результаты измерения структуры линий фоторезиста: *a* – РЭМ-изображение поперечного сечения; *б* – 3D-АСМ-изображение; *в* – АСМ-профиль сечения [33]

Fig. 14. The measurement results of a photoresist line: *a* – cross-sectioned SEM image; *b* – 3D-AFM image; *c* – AFM profile of the cross-section [33]

АСМ с наклоном зонда от нормали к поверхности образца еще один подход к трехмерным измерениям структур [7, 34]. С помощью этого метода образец измеряется в разных проекциях, в которых зонд наклонен по отношению к образцу под разными углами (рис. 15). Таким образом, боковые стенки с крутым углом наклона могут быть измерены традиционным зондом конической или пирамидальной формы. Путем сшивки полученных под разными углами наклона изображений можно определить реальную форму исследуемого элемента [34]. Проблема данного метода заключается в том, что точность сшивки изображений напрямую влияет на прецизионность, производительность и оперативность получения готового результата.

Применение АСМ для контроля критических размеров, в том числе вертикальных структур, в производственном цикле существенно ограничено. Во-первых, метод хорошо подходит для сканирования небольших образцов (до 3×3 см) и редко предназначен для сканирования кремниевых пластин. Однако известны промышленные решения, например модель АСМ Vega (ООО «НТ-МДТ», г. Москва). Таким образом, для исследования, так же как и в случае РЭМ поперечного сечения, предполагается разрушающая подготовка образца. Во-вторых, производительность АСМ существенно ниже, чем у РЭМ. И, в-третьих, метод имеет низкую воспроизводимость при контроле профилей вследствие быстрого изнашивания зондов.

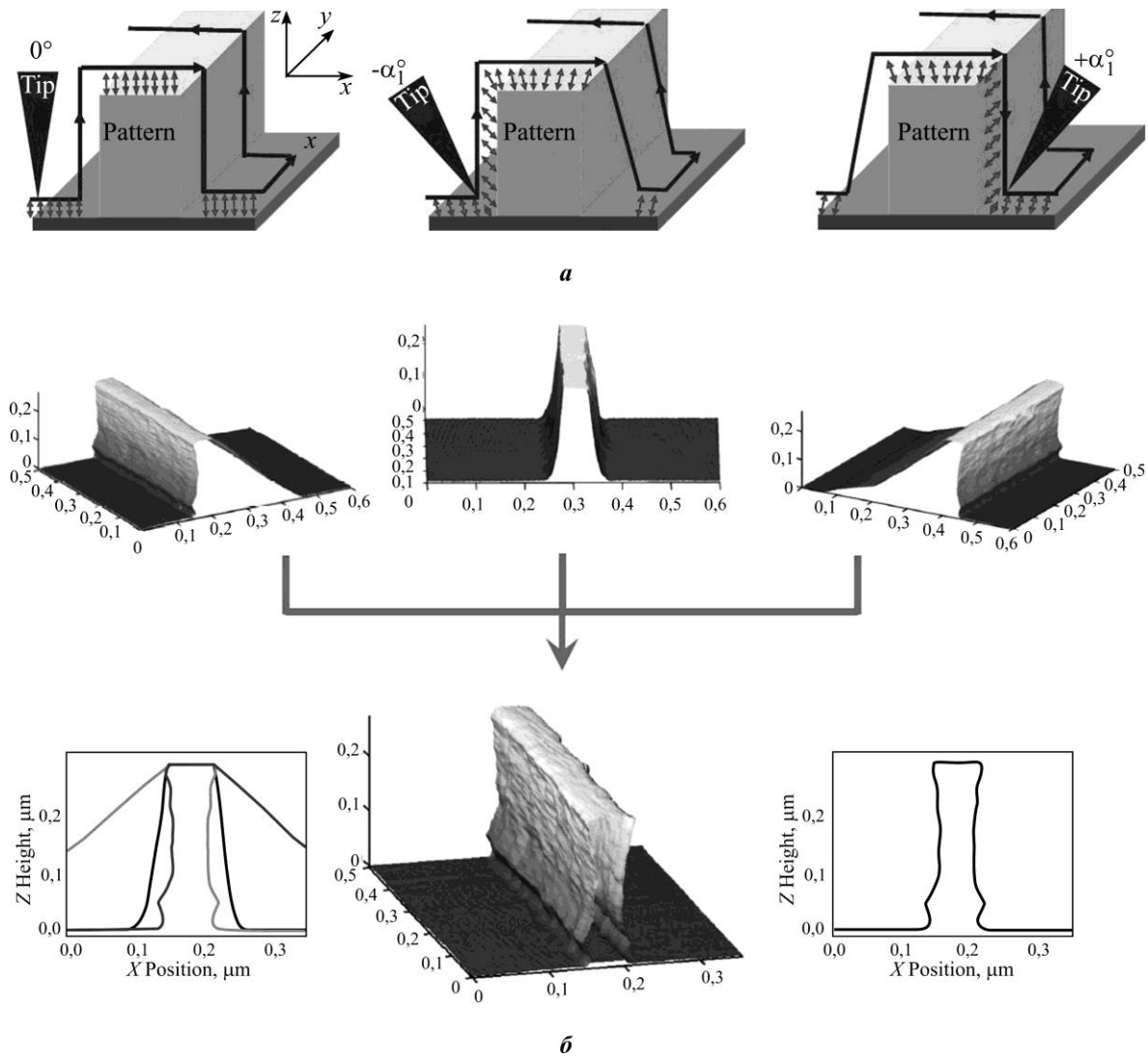


Рис. 15. Измерение профиля структуры с помощью АСМ с наклоном: *a* – сканирование при разных углах наклона зонда; *b* – шивка полученных результатов в единое 3D-изображение [34]
 Fig. 15. Measurement of the structure's profile using tilt AFM: *a* – scanning at different tilt angles of probe; *b* – stitching of the obtained results into a single 3D image [34]

Следует отметить, что специализированные зонды для контроля структур с высоким аспектным отношением имеют высокую стоимость (в среднем 1000 евро за один зонд). Производительность типичных установок CD-AFM составляет 12–30 пластин в час [35]. Стоимость оборудования значительно более низкая по сравнению со стоимостью установок CD-SEM.

Оптическая скаттерометрия. Несмотря на то что установки CD-SEM, CD-АСМ и ПЭМ предназначены для измерения критических размеров в производстве полупроводниковых приборов и могут измерять наноразмерные элементы, они, как правило, требуют много времени для измерений, характеризуются высокой стоимостью оборудования, а также сложны в эксплуатации и проблематичны в реализации in-line-систем контроля, интегрированных в производственный цикл. Более того, РЭМ поперечного сечения и ПЭМ требуют разрушения образца, что не позволяет обеспечить достаточный объем выборки [36]. В конце 1990-х гг. появилось коммерческое решение, которое смогло удовлетворить многие потребности in-line-систем контроля для массового про-

изводства – метод оптической скаттерометрии, или оптическая метрология критических размеров (Optical Critical Dimensions, OCD). В настоящее время на зарубежных производствах с технологическими нормами менее 90 нм этот метод становится основным инструментом контроля критических размеров и формы трехмерных структур.

Скаттерометрия традиционно известна как метод анализа излучения, рассеянного от различных структур, дефектов и частиц, с целью количественной оценки их размеров, формы, пространственного расположения и т. п. и применяется в радиолокации и метеорологии. В контексте полупроводниковой технологии, несмотря на то же название, метод оптической скаттерометрии – это метод, основанный на дифракции света (Diffraction-Based Metrology), в котором анализируется дифрагированное от периодических структур, изготовленных на кремниевых пластинах, излучение с целью восстановления пространственных профилей этих структур. По сравнению с традиционными методами измерений, основанными на анализе изображений (Image-Based Metrology), которые могут напрямую получать информацию о размерах элементов, не опираясь на конкретные свойства образца, оптическая скаттерометрия является косвенным методом определения критических размеров по измеренному отклику. В данном случае оптический отклик исследуемого образца определяется его оптическими свойствами (коэффициентом преломления, поглощения, элементами матрицы Мюллера и т. д.) [36, 37].

Реализация метода в основном состоит из двух этапов. На первом этапе с помощью нужных измерительных инструментов, например эллипсометрии, определяется оптический отклик периодической структуры. Эллипсометр измеряет изменение поляризации света, отраженного от исследуемого образца, в виде комплексного коэффициента отражения, состоящего из амплитудной составляющей Ψ и разности фаз Δ . С использованием параметров Ψ и Δ рассчитываются такие характеристики, как толщина, состав, шероховатость, коэффициенты преломления и отражения и т. д. Второй этап – обратная задача скаттерометрии – представляет собой метод, с помощью которого определяется геометрия исследуемого образца (линейные размеры, толщина и ширина линий, углы наклона боковых стенок и т. д.) на основе измеренного оптического отклика. Для этого используются различные методы моделирования, например метод связанных волн, или RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) [36]. На рис. 16 представлена общая схема процесса проведения измерений, а на рис. 17 – блок-схема, поясняющая процесс восстановления пространственного профиля исследуемой структуры (через создание библиотеки элементов). Кроме того, решение обратной задачи возможно также и в режиме реального времени на измерительном оборудовании.

В настоящее время разработано множество различных установок скаттерометрии для промышленного использования. Такое оборудование в соответствии с направлением распространения излучения (волнового вектора k) и длины волны источника, или угловой частоты ω , классифицируется по двум категориям: угловые скаттерометры, т. е. рефлектометры с монохроматическим источником излучения и изменяющимся углом падения, и спектральные скаттерометры на основе спектрального эллипсометра с широкополосным источником излучения и неизменным углом падения, или спектофотометра. На рис. 18 показаны принципиальные различия данных типов скаттерометров.

Построенная оптико-геометрическая модель образца должна с хорошей точностью отражать реальный объект измерений и учитывать диапазоны изменения параметров структуры. Далее необходимо найти соответствие между моделью и экспериментальными данными. Для этого используются различные численные методы, такие как нелинейная регрессия, библиотечный поиск, алгоритмы оптимизации и др. [36].

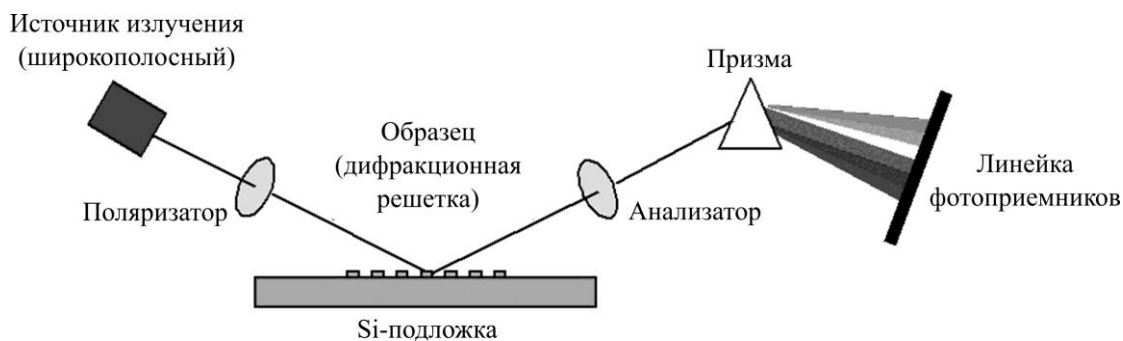


Рис. 16. Структурная схема процесса проведения измерений на основе спектральной эллипсометрии [38]
Fig. 16. Block diagram of the measurement process based on spectroscopic ellipsometry [38]

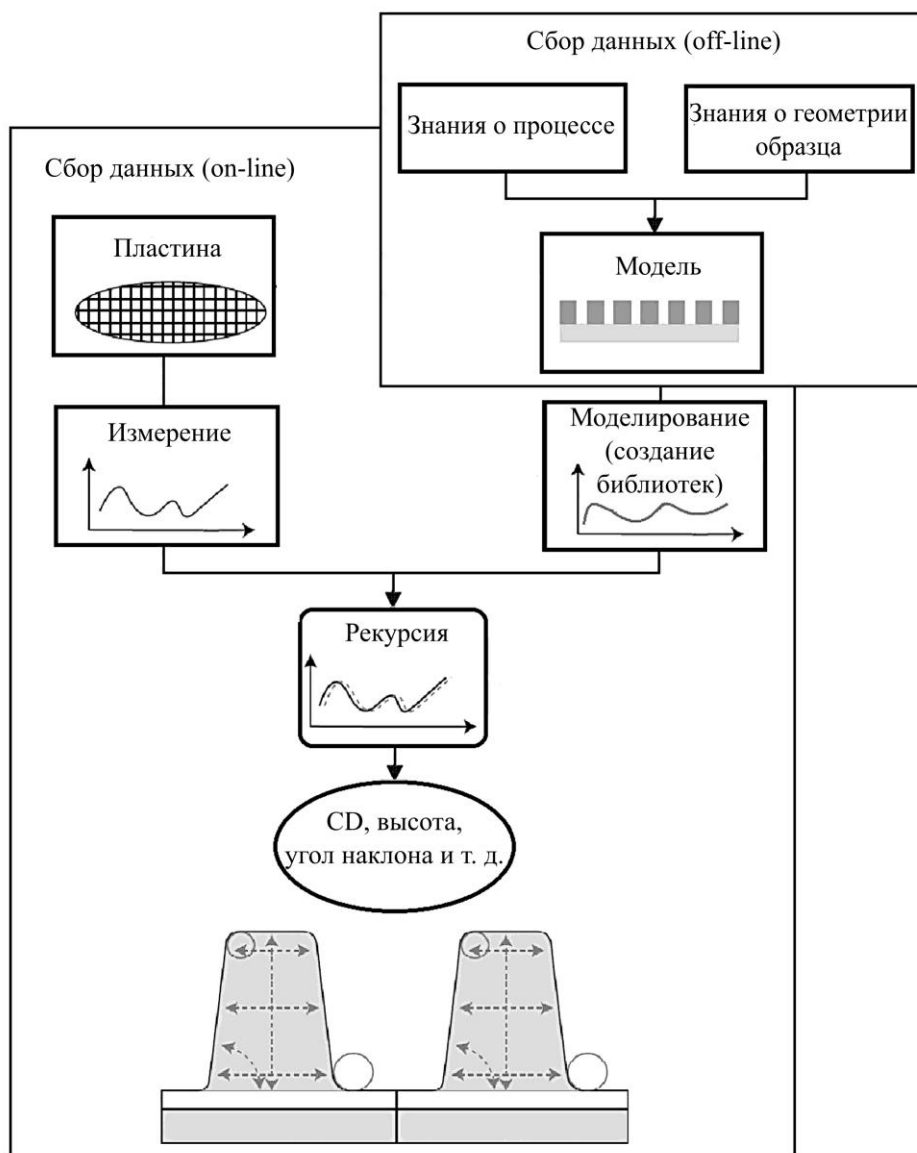


Рис. 17. Схема восстановления пространственного профиля структуры с помощью создания библиотеки элементов [5, 38]
Fig. 17. Scheme for reconstructing spatial profile of structure by element's library creation [5, 38]

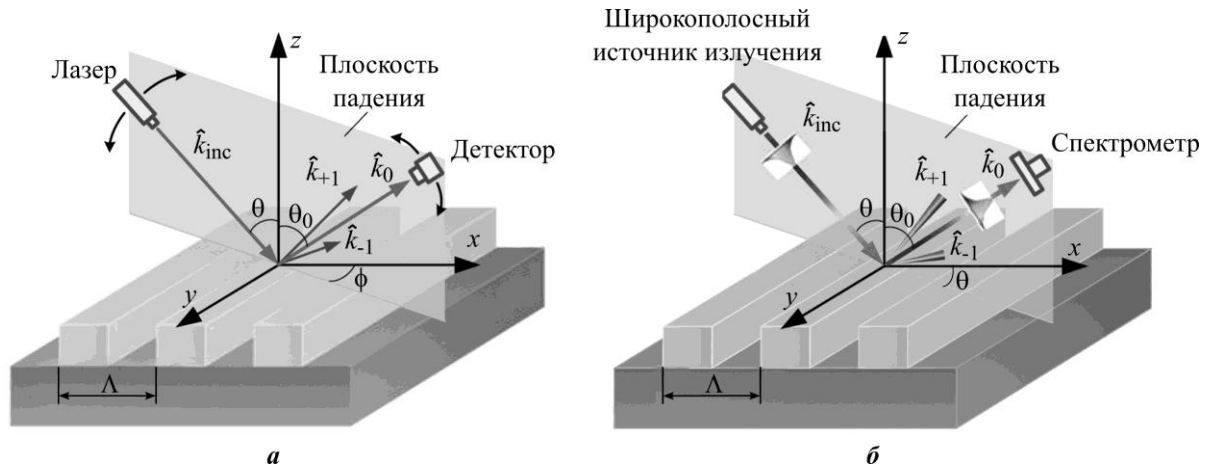


Рис. 18. Схематическое изображение устройства скаттерометров: *a* – на основе рефлектометра; *b* – на основе спектрального эллипсометра [36]

Fig. 18. Schematic representation of scatterometers: *a* – based on angular reflectometer; *b* – based on spectroscopic ellipsometry [36]

Измерения с помощью скаттерометрии проводятся внутри периодически повторяющейся топологии на образце, которая представляет собой дифракционную решетку. Для производства ряд образцов с однотипной топологией является типичным случаем. Необходимые размеры решетки определяются размером пятна источника излучения и составляют $\sim 50 \times 50$ мкм (примерный размер пятна эллипсометрии). Контрольную площадку такого размера легко встроить в дорожку скрайбирования между кадрами. Это делает оптическую скаттерометрию пригодной для in-line-систем контроля критических размеров и формы элементов. В то же время геометрические параметры дифракционной решетки отражают параметры технологической операции, при которой она формируется, поскольку решетка и основная топология ИС создаются в едином технологическом цикле.

Оптическая скаттерометрия активно применяется для контроля критических размеров в фотолитографических процессах [39], процессах химико-механической полировки [40] и травления [41]. В работе [41] авторы сообщают о внедрении оптической скаттерометрии в производственный процесс для контроля процессов травления затворов FinFET-транзисторов. Получено хорошее соответствие с результатами измерений критических размеров на установке CD-SEM. Также показана высокая точность (менее 0,1 нм), стабильность и воспроизводимость, оцениваемая как среднеквадратичное отклонение, результатов оптической скаттерометрии.

В работе [42] продемонстрирована возможность применения метода скаттерометрии для контроля размеров спейсеров (пристенков) фотомаски, изготовленной по технологии двойного формирования рисунка с самосовмещением (self-alignment dual patterning). Данная технология используется для повышения разрешения проекционной фотолитографии, а формируемая фотомаска представляет собой парные боковые пристенки, пространство между которыми («ядро») может заполняться различными материалами при дальнейшем формировании приборных структур, таких как ячейки памяти, затворные узлы и др. [42]. Также в работе проведено сравнение полученных результатов с данными CD-SEM (рис. 19). Для некоторых критических параметров в результатах наблюдается разница (6–12 нм). Авторы объясняют данную разницу тем, что для CD-SEM характерен эффект затенения данных структур, при котором угол наклона боковой стенки влияет на получаемый контраст изображения. Такой эффект может

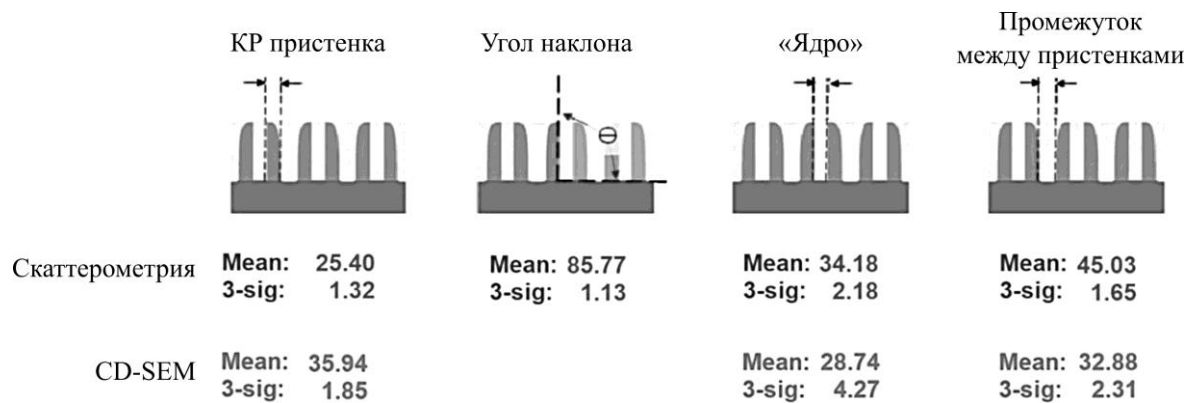


Рис. 19. Сравнение результатов измерений критических размеров спейсеров (пристенков) фотомаски в виде среднего значения (mean) и трех среднеквадратичных отклонений (3-sig) для оптической скаттерометрии и CD-SEM [42]

Fig. 19. Comparison of measurements results of critical sizes of the photomask spacers (sidewalls) in the form of an average (mean) and three standard deviations (3-sig) for optical scatterometry and CD-SEM [42]

вносить ошибку в результаты измерения. Корректность результатов скаттерометрии проверена с помощью РЭМ поперечного сечения, разница в результатах с которой составила 0,8–1,5 нм. Стоит также отметить более низкие значения трех сигм для скаттерометрии по сравнению с CD-SEM.

Множество работ посвящено использованию оптической скаттерометрии для контроля процессов формирования фоторезистивных масок [39, 42–45]. Также сообщается о применении скаттерометрии для контроля критических размеров канавок ячеек памяти с высоким аспектным отношением [4], для контроля шероховатостей LWR и LER [4] многотворных транзисторов [8], GAA-транзисторов [24], а также для контроля размещения литографических слоев [36].

Многие коммерчески доступные установки скаттерометрии используются для контроля критических размеров элементов до уровня 65–45 нм. Это связано со спектральным диапазоном источников излучения, применяемых в установках данного типа (примерно от 250 до 800 нм). Использование оптической скаттерометрии для меньших проектных норм может стать возможным при использовании источников с меньшей длиной волны, например дейтериевых ламп (150–400 нм и менее). Однако последующее снижение спектрального диапазона кажется проблематичным, поскольку возникает необходимость вакуумирования оптической системы, ее продувки сверхчистыми газами или применения других технических решений [46], которые неизбежно приведут к резкому росту стоимости оборудования.

Преимущества оптической скаттерометрии перед электронной микроскопией заключаются, прежде всего, в используемом оборудовании. Во-первых, для нее не требуется вакуум. Во-вторых, не требуются высоковольтные источники, электронная колонна и т. п., что в совокупности делает оборудование для скаттерометрии более дешевым. Еще одним преимуществом является более высокая производительность. Для оптической скаттерометрии производительность сравнима с эллипсометрией, для которой она может достигать 100 пластин в час. Также стоит отметить неразрушающий характер воздействия на образец и отсутствие необходимости проводить дополнительную подготовку образца или занимать отдельные тестовые структуры на полезной площади пластины. В связи с этим для контроля трехмерного профиля структур, в частности фо-

торезистивных масок, целесообразно использовать оптическую скаттерометрию, а не РЭМ для технологий уровня менее 130 нм. Основная сложность при использовании данной методики заключается в трудоемкости создания оптико-геометрических моделей исследуемых структур. Кроме того, процесс моделирования может занимать длительное время, особенно при отсутствии мощных вычислительных станций.

Анализ малоуглового рентгеновского рассеяния. Мировые производители измерительного оборудования в настоящее время разрабатывают средства измерений критических размеров, работающие в рентгеновском диапазоне длин волн. В частности, некоторые компании работают над созданием промышленной установки анализа картин малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (Critical Dimensions Small-Angle X-ray Scattering, CD-SAXS) [47]. Данная установка сможет применяться на технологических уровнях 10 нм и менее.

Разрабатываемая методика является дальнейшим развитием оптической скаттерометрии. Для характеристики критических размеров и профиля исследуемого образца используется анализ картины дифракции рентгеновского излучения. Таким образом, в оборудовании CD-SAXS используются рентгеновские источники излучения. Традиционно рентгеновское рассеяние (дифракция) применяется для определения структуры материалов в атомном масштабе. Измерения с помощью CD-SAXS можно сравнить с анализом картины дифракции монокристаллического материала, где период решетки – это период структуры (соотношение линий промежуткам), а атомы – это повторяющиеся наноструктурные элементы [23].

В настоящее время разработаны различные конфигурации оборудования с принципиально разными возможностями: с использованием рентгеновских лучей скользящего падения (Grazing Incidence of X-rays, GI CD-SAXS) и с использованием проходящих лучей (Transmission of X-rays, T CD-SAXS). Геометрия падения излучения на исследуемый образец данных конфигураций показана на рис. 20. Поверхность образца более чувствительна к лучам скользящего падения, и, поскольку они также отражаются от образца, в случае GI CD-SAXS возможно использование менее энергетичных пучков (около 8 кэВ) с умеренной яркостью луча для достижения более высокой скорости измерений. Однако при скользящем падении размер пятна падающего излучения достаточно большой (вытянутая форма пятна), что может не подходить для большинства измерительных площадок. В случае проходящих лучей исследование образца в основном выполняется с использованием источников синхротронного излучения при более высоких энергиях пучка. Очевидно, что синхротронные источники имеют слишком большие размеры и высокую стоимость, что делает их непрактичными для использования в микроэлектронном производстве [4]. Поэтому в настоящее время ведутся разработки источников, которые позволят повысить производительность установки CD-SAXS.

Длительность процесса проведения измерений определяется материалами образца (разницей в рассеивании в них рентгеновского излучения), мощностью источника излучения, размером пятна, проецируемого на образец, а также эффективностью детектора [47]. Сообщается, что с помощью CD-SAXS возможно определять критические размеры, шероховатость края линии и трехмерный профиль структур, в том числе затворов FinFET-транзисторов, GAA-транзисторов и фоторезистивных масок [4, 23, 48, 49]. К преимуществам использования CD-SAXS относится возможность анализа оптически непрозрачных материалов [23]. Основные усилия разработчиков оборудования для CD-SAXS сосредоточены на достижении низкого уровня шума источника и приемлемого размера пятна [4].

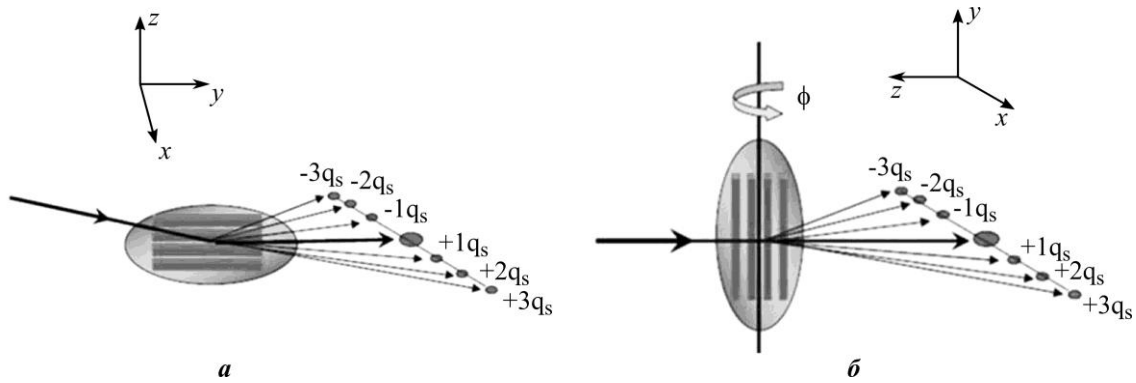


Рис. 20. Геометрия падения и отражения рентгеновского излучения для CD-SAXS скользящего падения (а) и проходящих лучей (б) [4]
 Fig. 20. Geometry of X-rays incidence and reflection for CD-SAXS grazing incidence (a) and transmitted beams (b) [4]

Сравнение методов критических размеров элементов ИС. В табл. 1 для сравнения приведены методы, применяемые в производственных циклах для контроля критических размеров и трехмерного профиля структур. Ключевыми параметрами, определяющими использование конкретной методики в качестве in-line-системы контроля в непрерывном технологическом цикле, являются: время на проведение измерений (длительность операции контроля), область для тестовых измерений (размеры измерительных площадок, необходимость дополнительной площади на пластине) и характер воздействия на образец (или требования к его подготовке). В табл. 2 отражена матрица данных критериев для всех рассмотренных в настоящей работе методов контроля.

Таблица 1
Сравнение методов контроля критических размеров элементов ИС [4, 23, 49, 50]
Table 1
Comparison of methods for IC elements CD control [4, 23, 49, 50]

CD-SEM	CD-AFM	OCD	CD-SAXS	CD-TEM
Физический принцип				
Взаимодействие электронного пучка и твердого тела	Ван-дер-ваальсовое взаимодействие поверхности и зонда	Дифракция света на периодической решетке	Дифракция рентгеновского излучения на дифракционной решетке	Взаимодействие электронного пучка и твердого тела
Разрешение (горизонтальное и вертикальное)				
~ 0,1 нм	< 0,01 нм (вертикальное) < 1 нм (горизонтальное)	~ 1 нм (разрешение зависит от модели)	~ 0,2 нм и ниже	0,08 нм (горизонтальное)
Изменяемые структуры				
Любые		Периодические и «квазипериодические»	Периодические	Любые
Воздействие на образец				
Сгорание фоторезиста, зарядка (диэлектриков)	Неразрушающее	Неразрушающее	Неразрушающее, в том числе для проходящих лучей	Разрушающее

Окончание

CD-SEM	CD-AFM	OCD	CD-SAXS	CD-TEM
Время получения результата				
Секунды	Минуты – часы	Секунды (разрабатываемые модели – дни)	Минуты (разрабатываемые модели – дни)	Часы
Преимущества				
Быстрота настройки, высокая производительность	3D-измерения (особые технические решения), высокая точность	3D-измерения, быстрота измерений	3D-измерения, измерения критических размеров менее 10 нм	Использование в качестве «золотого стандарта» измерений
Ключевые недостатки и ограничения				
Сложности анализа контраста боковых стенок	Низкая производительность, износ зондов	Необходимость разработки точных моделей	Дороговизна оборудования, сложности получения яркого и когерентного пучка	Не подходит для in-line-систем контроля

Таблица 2

Уровни возможностей применения методов контроля критических размеров элементов ИС в качестве in-line-систем на производстве [4]

Table 2

The levels of possibilities of using methods for controlling the critical dimensions of IC elements as in-line systems in production [4]

Критерий	CD-SEM	CD-ACM	OCD	CD-SAXS
Время измерений (операции контроля)	Приемлемый	Недостаточный	Высокий	Недостаточный
Область для контроля	Высокий		Приемлемый	
Разрушаемость (воздействии на образец)	Приемлемый	Высокий	Высокий	
Способность контроля профиля	Недостаточный	Приемлемый		

Заключение. Анализ возможностей основных методов измерения критических размеров элементов топологии ИС контролировать полный трехмерный профиль структур, включая размеры по верху и низу линии, угол наклона боковых стенок, высоту и др., показал следующее. Методы растровой электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии могут применяться для такого контроля в режиме производственного цикла, однако для этого требуются нестандартные технические решения и более дорогое оборудование. Благодаря неразрушающему и бесконтактному характеру, относительной простоте оборудования, а также возможности контроля трехмерного профиля исследуемой структуры, метод оптической скаттерометрии может стать одним из главных инструментов для контроля критических размеров в режиме производственного цикла. Данный метод использует стандартную интерферометрическую технику (например, спектральную эллисометрию) и позволяет анализировать картины дифракции от периодических структур с целью реконструкции их полного профиля. Основная

сложность метода заключается в необходимости разработки оптико-геометрических моделей структур.

Разрабатываемые в настоящее время рентгеновские методы измерений способны контролировать критические размеры для технологии 10 нм и ниже. Однако в настоящее время они не могут в полной мере использоваться на производстве. Разработанные на сегодняшний день установки CD-SAXS имеют низкую производительность, а также слишком высокую стоимость.

Литература

1. **Pham D., Larson L., Yang J.-W.** FinFET device junction formation challenges // 2006 International Workshop on Junction Technology. Shanghai: IEEE, 2006. P. 73–77. <https://doi.org/10.1109/IWJT.2006.220864>
2. Metrology capabilities and needs for 7 nm and 5 nm logic nodes / **B. Bunday, E. Solecky, A. Vaid et al.** // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXI. 2017. Vol. 10145. Art. ID: 101450G. <https://doi.org/10.1117/12.2260870>
3. Ionizing radiation damage in 65 nm CMOS technology: Influence of geometry, bias and temperature at ultra-high doses / **G. Borghello, E. Lerario, F. Faccio et al.** // Microelectronics Reliability. 2021. Vol. 116. Art. No. 114016. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.114016>
4. Gaps analysis for CD metrology beyond the 22 nm node / **B. Bunday, Th. A. Germer, V. Vartanian et al.** // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII. 2013. Vol. 8681. Art. ID: 86813B. <https://doi.org/10.1117/12.2012472>
5. **Герасименко Н., Волоховский А., Запорожан О.** Особенности контроля технологии кремниевых наноструктур // Наноиндустрия. 2017. № 5 (76). С. 36–51. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2017.76.5.36.51>
6. **Ukrainsev V. A., Baum Ch., Zhang G., Hall C. L.** The role of AFM in semiconductor technology development: The 65 nm technology node and beyond // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX. 2005. Vol. 5752. Art. ID: 602758. <https://doi.org/10.1117/12.602758>
7. Development of a 3D-AFM for true 3D measurements of nanostructures / **G. Dai, W. Hüßler-Grohne, D. Hüser et al.** // Meas. Sci. Technol. 2011. Vol. 22. No. 9. Art. No. 094009. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094009>
8. **Макушин М. В.** Скаттерометрия и перспективные полупроводниковые технологии // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2021. № 6 (207). С. 44–53. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.207.6.44.53>
9. **Кузин А. Ю., Марютин В. Н., Календин В. В.** Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне // Микросистемная техника. 2001. № 4. С. 9–19. EDN HOIBUT.
10. Metrology challenges in 3D NAND flash technical development and manufacturing / **W. Zhang, J. Xu, S. Wang et al.** // J. Microelectron. Manuf. 2020. Vol. 3. No. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.33079/jomm.20030102>
11. Resist shrink characterization methodology for more accurate CD metrology / **M. A. Breton, K. Petrillo, J. Church et al.** // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control XXXVI. 2022. Vol. PC12053. Art. ID: PC120530C. <https://doi.org/10.1117/12.2614219>
12. Time-dependent electron-beam-induced photoresist shrinkage effects / **B. D. Bunday, A. Cordes, C. Hartig et al.** // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. 2012. Vol. 11. Iss. 2. Art. No. 023007. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.11.2.023007>
13. Mechanism of ArF resist-pattern shrinkage in critical-dimension scanning electron microscopy measurement / **T. Azuma, K. Chiba, H. Abe et al.** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2004. Vol. 22. Iss. 1. P. 226–230. <https://doi.org/10.1116/1.1643055>
14. 193-nm resist: Ultralow voltage CD-SEM performance for sub-130-nm contact hole process / **J. E. Ferri, M. Vieira, M. Reybrouck et al.** // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVII. 2003. Vol. 5038. Art. ID: 487597. <https://doi.org/10.1117/12.487597>
15. **Sundaram G., Sullivan N. T., Mai T., Ke Ch.-M.** Low-impact resist metrology: The use of ultralow voltage for high-accuracy performance // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVIII. 2004. Vol. 5375. Art. ID: 539221. <https://doi.org/10.1117/12.539221>
16. **Sundaram G., Lee B.-H., Mai T., Sullivan N. T.** Minimizing the impact of image acquisition on CD-SEM LER/LWR measurements // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX. 2005. Vol. 5752. Art. ID: 601090. <https://doi.org/10.1117/12.601090>

17. Experiment and simulation of charging effects in SEM / *S. Babin, S. Borisov, Y. Miyano et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXII. 2008. Vol. 6922. Art. ID: 692219. <https://doi.org/10.1117/12.772255>
18. Novel three dimensional (3D) CD-SEM profile measurements / *W. Ito, B. Bunday, S. Harada et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII. 2014. Vol. 9050. Art. ID: 90500D. <https://doi.org/10.1117/12.2047374>
19. Amplitude and spatial frequency characterization of line-edge roughness using CD-SEM / *G. Eytan, O. Dror, L. Ithier et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVI. 2002. Vol. 4689. Art. ID: 473473. <https://doi.org/10.1117/12.473473>
20. *Marschner T., Stief C.* Characterization of 193-nm resist layers by CD-SEM sidewall imaging // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVII. 2003. Vol. 5038. Art. ID: 482808. <https://doi.org/10.1117/12.482808>
21. *Nasu O., Sasada K., Ikeda M., Ezumi M.* New CD-SEM system for 100-nm node process // Hitachi Review. 2002. Vol. 51. No. 4. P. 125–129.
22. *Monahan K. M., MacNaughton C., Waiman Ng, Quattrini R.* A systems approach to gate CD control: Metrology, throughput, and OEE // 1997 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings (Cat. No. 97CH36023). San Francisco, CA: IEEE, 1997. P. B53–B57. <https://doi.org/10.1109/ISSM.1997.664510>
23. Metrology for the next generation of semiconductor devices / *N. G. Orji, M. Badaroglu, B. M. Barnes et al.* // Nat. Electron. 2018. Vol. 1. No. 10. P. 532–547. <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0150-9>
24. *Keller N., Liu Zh.* Metrology solutions for gate-all-around transistors in high volume manufacturing // Semiconductor Digest Magazine. 2020. Vol. 2. No. 5. P. 24–28.
25. *Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch.* Atomic force microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56. Iss. 9. P. 930–933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
26. *Парфенов В. А., Юдин И. А.* Атомно-силовая микроскопия и ее применения в науке, технике и реставрации // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 9. С. 61–70. EDN UZCATX.
27. Improved etch and CMP process control using in-line AFM / *T. Trenkler, T. Kraiss, U. Mantz et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVIII. 2004. Vol. 5375. Art. ID: 535967. <https://doi.org/10.1117/12.535967>
28. *Трапашко Г. А.* Калибровка установок измерений размеров элементов микроэлектронных структур // Наука и техника. 2012. № 4. С. 22–30. EDN TORETB.
29. *Быков В. А.* Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21–33. EDN HOHZFV.
30. *Kado H., Yokoyama K., Tohda T.* A novel ZnO whisker tip for atomic force microscopy // Ultramicroscopy. 1992. Vol. 42–44. P. 1659–1663. [https://doi.org/10.1016/0304-3991\(92\)90501-A](https://doi.org/10.1016/0304-3991(92)90501-A)
31. *Kado H., Yamamoto Sh., Yokoyama K., Tohda T.* Observation of contact holes by atomic force microscopy with a ZnO whisker tip // Journal of Applied Physics. 1993. Vol. 74. Iss. 7. P. 4354–4356. <https://doi.org/10.1063/1.355313>
32. Advancement in fabrication of carbon nanotube tip for atomic force microscope using multi-axis nanomanipulator in scanning electron microscope / *S. K. Kanth, A. Sharma, B. C. Park et al.* // Nanotechnology. 2022. Vol. 33. No. 17. Art. No. 175703. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac4a2b>
33. New three-dimensional AFM for CD measurement and sidewall characterization / *Y. Hua, C. Buenviaje-Coggins, Y. Lee et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV. 2011. Vol. 7971. Art. ID: 797118. <https://doi.org/10.1117/12.879545>
34. Introduction of next-generation 3D AFM for advanced process control / *J. Foucher, R. Thérèse, Y. Lee et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII. 2013. Vol. 8681. Art. ID: 868106. <https://doi.org/10.1117/12.2011463>
35. Recent CD AFM probe developments for sub-45 nm technology nodes / *H.-C. Liu, J. R. Osborne, G. A. Dahlen et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXII. 2008. Vol. 6922. Art. ID: 69222J. <https://doi.org/10.1117/12.773057>
36. *Chen X., Liu S.* Optical scatterometry for nanostructure metrology // Metrology / ed. W. Gao. Singapore: Springer Nature, 2019. P. 477–513. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4938-5_17
37. *Beklemishev N. N., Benevolenskii S. B., Istomina N. L., Kopylov P. V.* Improvement of the accuracy of diffraction measurements of circuit feature sizes // Russ. Microelectron. 1998. Vol. 27. Iss. 6. P. 386–388.
38. Implementation of spectroscopic critical dimension (SCD) (TM) for gate CD control and stepper characterization / *J. A. Allgair, D. C. Benoit, M. Drew (Jr.) et al.* // Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XV. 2001. Vol. 4344. Art. ID: 436771. <https://doi.org/10.1117/12.436771>

39. Nondestructive analysis of lithographic patterns with natural line edge roughness from Mueller matrix ellipsometric data / **X. Chen, Y. Shi, H. Jiang et al.** // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 388. P. 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.167>
40. Fast and accurate scatterometry metrology method for STI CMP step height process evaluation / **C.-H. Lin, C. Huang, C.-L. Hsu et al.** // *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI*. 2012. Vol. 8324. Art. ID: 832421. <https://doi.org/10.1117/12.916235>
41. High speed optical metrology solution for after etch process monitoring and control / **A.-L. Charley, Ph. Leray, W. Pypen et al.** // *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII*. 2014. Vol. 9050. Art. ID: 90501H. <https://doi.org/10.1117/12.2047280>
42. Metrology characterization of spacer double patterning by scatterometry / **P. Dasari, J. Li, J. Hu et al.** // *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV*. 2011. Vol. 7971. Art. ID: 797111. <https://doi.org/10.1117/12.879900>
43. Advanced EUV resist characterization using scatterometry and machine learning / **D. Schmidt, K. Petrillo, M. Breton et al.** // 2021 32nd Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). Milpitas, CA: IEEE, 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ASMC51741.2021.9435698>
44. **El Kodadi M., Soulan S., Besacier M., Schiavone P.** Real time scatterometry for profile control during resist trimming process // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2009. Vol. 27. Iss. 6. P. 3232–3237. <https://doi.org/10.1116/1.3256594>
45. Multiparameter grating metrology using optical scatterometry / **Ch. J. Raymond, M. R. Murnane, S. L. Prins et al.** // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1997. Vol. 15. Iss. 2. P. 361–368. <https://doi.org/10.1116/1.589320>
46. **Buckner B. D., Hirleman E. D.** Deep-ultraviolet scatterometry for nanoparticle detection // *Proc. SPIE. Process Control and Diagnostics*. 2000. Vol. 4182. Art. ID: 410083. <https://doi.org/10.1117/12.410083>
47. **Ito Y., Higuchi A., Omote K.** Characterization of cross-sectional profile of resist L/S and hole pattern using CD-SAXS // *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXX*. 2016. Vol. 9778. Art. ID: 97780L. <https://doi.org/10.1117/12.2218983>
48. Nonplanar high-k dielectric thickness measurements using CD-SAXS / **C. Wang, K.-W. Choi, Y.-C. Chen et al.** // *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIII*. 2009. Vol. 7272. Art. ID: 72722M. <https://doi.org/10.1117/12.813757>
49. Pattern fidelity in nanoimprinted films using CD-SAXS / **R. L. Jones, Ch. L. Soles, E. K. Lin et al.** // *Proc. SPIE. Emerging Lithographic Technologies IX*. 2005. Vol. 5751. Art. ID: 600267. <https://doi.org/10.1117/12.600267>
50. A holistic metrology approach: Hybrid metrology utilizing scatterometry, CD-AFM, and CD-SEM / **A. Vaid, B. B. Yan, Y. T. Jiang et al.** // *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV*. 2011. Vol. 7971. Art. ID: 797103. <https://doi.org/10.1117/12.881632>

Обзор поступил в редакцию 19.12.2022 г.; одобрен после рецензирования 09.01.2023 г.;
принят к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Нелюбин Илья Вадимович – аспирант Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), nelyubin.iv@mail.ru

Путьря Михаил Георгиевич – доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), ftdek@miee.ru

References

1. Pham D., Larson L., Yang J.-W. FinFET device junction formation challenges. *2006 International Workshop on Junction Technology*. Shanghai, IEEE, 2006, pp. 73–77. <https://doi.org/10.1109/IWJT.2006.220864>
2. Bunday B., Solecky E., Vaid A., Bello A. F., Dai X. Metrology capabilities and needs for 7 nm and 5 nm logic nodes. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXI*, 2017, vol. 10145, art. ID: 101450G. <https://doi.org/10.1117/12.2260870>
3. Borghello G., Lerario E., Faccio F., Koch H. D., Termo G., Michelis S., Marquez F. J., Palomo F. R., Muñoz F. Ionizing radiation damage in 65 nm CMOS technology: Influence of geometry, bias and temperature

at ultra-high doses. *Microelectronics Reliability*, 2021, vol. 116, art. no. 114016. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.114016>

4. Bunday B., Germer Th. A., Vartanian V., Cordes A., Cepler A., Settens Ch. Gaps analysis for CD metrology beyond the 22 nm node. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII*, 2013, vol. 8681, art. ID: 86813B. <https://doi.org/10.1117/12.2012472>

5. Gerasimenko N., Volokhovskiy A., Zaporozhan O. Features of control of silicon nanostructures technology. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2017, no. 5 (76), pp. 36–51. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2017.76.5.36.51>

6. Ukraintsev V. A., Baum Ch., Zhang G., Hall C. L. The role of AFM in semiconductor technology development: The 65 nm technology node and beyond. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX*, 2005, vol. 5752, art. ID: 602758. <https://doi.org/10.1117/12.602758>

7. Dai G., Häbller-Grohne W., Hüser D., Wolff H., Danzebrink H.-U., Koenders L., Bosse H. Development of a 3D-AFM for true 3D measurements of nanostructures. *Meas. Sci. Technol.*, 2011, vol. 22, no. 9, art. no. 094009. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094009>

8. Makushin M. Scatterometry and advanced semiconductor technologies. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2021, no. 6 (207), pp. 44–53. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.207.6.44.53>

9. Kuzin A. Iu., Mariutin V. N., Kalendin V. V. Methods and means of linear sizes dimensions in nanometer range. *Mikrosistemnaya tekhnika = Microsystems Engineering*, 2001, no. 4, pp. 9–19. (In Russian). EDN HOIBUT.

10. Zhang W., Xu J., Wang S., Zhou Y., Mi J. Metrology challenges in 3D NAND flash technical development and manufacturing. *J. Microelectron. Manuf.*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.33079/jomm.20030102>

11. Breton M. A., Petrillo K., Church J., Meli L., Fullam J., Sieg S., Lallement R., Felix N. et al. Resist shrink characterization methodology for more accurate CD metrology. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control XXXVI*, 2022, vol. PC12053, art. ID: PC120530C. <https://doi.org/10.1117/12.2614219>

12. Bunday B. D., Cordes A., Hartig C., Allgair J. A., Vaid A., Solecky E., Rana N. Time-dependent electron-beam-induced photoresist shrinkage effects. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, vol. 11, iss. 2, art. no. 023007. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.11.2.023007>

13. Azuma T., Chiba K., Abe H., Motoki H., Sasaki N. Mechanism of ArF resist-pattern shrinkage in critical-dimension scanning electron microscopy measurement. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2004, vol. 22, iss. 1, pp. 226–230. <https://doi.org/10.1116/1.1643055>

14. Ferri J. E., Vieira M., Reybrouck M., Mastovich M. E., Bowdoin S., Brandom R., Knutrud P. C. 193-nm resist: Ultralow voltage CD-SEM performance for sub-130-nm contact hole process. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVII*, 2003, vol. 5038, art. ID: 487597. <https://doi.org/10.1117/12.487597>

15. Sundaram G., Sullivan N. T., Mai T., Ke Ch.-M. Low-impact resist metrology: The use of ultralow voltage for high-accuracy performance. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVIII*, 2004, vol. 5375, art. ID: 539221. <https://doi.org/10.1117/12.539221>

16. Sundaram G., Lee B.-H., Mai T., Sullivan N. T. Minimizing the impact of image acquisition on CD-SEM LER/LWR measurements. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX*, 2005, vol. 5752, art. ID: 601090. <https://doi.org/10.1117/12.601090>

17. Babin S., Borisov S., Miyano Y., Abe H., Kadowaki M., Hamaguchi A., Yamazaki Y. Experiment and simulation of charging effects in SEM. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXII*, 2008, vol. 6922, art. ID: 692219. <https://doi.org/10.1117/12.772255>

18. Ito W., Bunday B., Harada S., Cordes A., Murakawa T., Arceo A., Yoshikawa M., Hara T., Arai T., Shida S. et al. Novel three dimensional (3D) CD-SEM profile measurements. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII*, 2014, vol. 9050, art. ID: 90500D. <https://doi.org/10.1117/12.2047374>

19. Eytan G., Dror O., Ithier L., Florin B., Lamouchi Z., Martin N. Amplitude and spatial frequency characterization of line-edge roughness using CD-SEM. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVI*, 2002, vol. 4689, art. ID: 473473. <https://doi.org/10.1117/12.473473>

20. Marschner T., Stief C. Characterization of 193-nm resist layers by CD-SEM sidewall imaging. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVII*, 2003, vol. 5038, art. ID: 482808. <https://doi.org/10.1117/12.482808>

21. Nasu O., Sasada K., Ikeda M., Ezumi M. New CD-SEM system for 100-nm node process. *Hitachi Review*, 2002, vol. 51, no. 4, pp. 125–129.

22. Monahan K. M., MacNaughton C., Waiman Ng, Quattrini R. A systems approach to gate CD control: Metrology, throughput, and OEE. *1997 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings (Cat. No. 97CH36023)*. San Francisco, CA, IEEE, 1997, pp. B53–B57. <https://doi.org/10.1109/ISSM.1997.664510>
23. Orji N. G., Badaroglu M., Barnes B. M., Beitia C., Bunday B. D., Celano U., Kline R. J., Neisser M., Obeng Y., Vladar A. E. Metrology for the next generation of semiconductor devices. *Nat. Electron.*, 2018, vol. 1, no. 10, pp. 532–547. <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0150-9>
24. Keller N., Liu Zh. Metrology solutions for gate-all-around transistors in high volume manufacturing. *Semiconductor Digest Magazine*, 2020, vol. 2, no. 5, pp. 24–28.
25. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch. Atomic force microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, vol. 56, iss. 9, pp. 930–933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
26. Parfenov V. A., Yudin I. A. Atomic force microscopy and its application in science, engineering and restoration. *Izv. SPbGETU “LETI” = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2015, no. 9, pp. 61–70. (In Russian). EDN UZCATX.
27. Trenkler T., Kraiss T., Mantz U., Weidner P., Pinto R. H. Improved etch and CMP process control using in-line AFM. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVIII*, 2004, vol. 5375, art. ID: 535967. <https://doi.org/10.1117/12.535967>
28. Trapashko G. Calibration of devices for measuring elements of micro-electronic structures. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*, 2012, no. 4, pp. 22–30. (In Russian). EDN TORETB.
29. Bykov V. A. Micromechanics for scanning probe microscopy and nanotechnology. *Mikrosistemnaya tekhnika = Microsystems Engineering*, 2000, no. 1, pp. 21–33. (In Russian). EDN HOHZFV.
30. Kado H., Yokoyama K., Tohda T. A novel ZnO whisker tip for atomic force microscopy. *Ultramicroscopy*, 1992, vol. 42–44, pp. 1659–1663. [https://doi.org/10.1016/0304-3991\(92\)90501-A](https://doi.org/10.1016/0304-3991(92)90501-A)
31. Kado H., Yamamoto Sh., Yokoyama K., Tohda T. Observation of contact holes by atomic force microscopy with a ZnO whisker tip. *Journal of Applied Physics*, 1993, vol. 74, iss. 7, pp. 4354–4356. <https://doi.org/10.1063/1.355313>
32. Kanth S. K., Sharma A., Park B. C., Song W., Ruh H., Hong J. Advancement in fabrication of carbon nanotube tip for atomic force microscope using multi-axis nanomanipulator in scanning electron microscope. *Nanotechnology*, 2022, vol. 33, no. 17, art. no. 175703. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac4a2b>
33. Hua Y., Buenviaje-Coggins C., Lee Y., Lee J., Ryang K., Park S. New three-dimensional AFM for CD measurement and sidewall characterization. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV*, 2011, vol. 7971, art. ID: 797118. <https://doi.org/10.1117/12.879545>
34. Foucher J., Thérèse R., Lee Y., Park S.-I., Cho S.-J. Introduction of next-generation 3D AFM for advanced process control. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII*, 2013, vol. 8681, art. ID: 868106. <https://doi.org/10.1117/12.2011463>
35. Liu H.-C., Osborne J. R., Dahlen G. A., Greschner J., Bayer Th., Kalt S., Fritz G. Recent CD AFM probe developments for sub-45 nm technology nodes. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXII*, 2008, vol. 6922, art. ID: 69222J. <https://doi.org/10.1117/12.773057>
36. Chen X., Liu S. Optical scatterometry for nanostructure metrology. *Metrology*, ed. W. Gao. Singapore, Springer Nature, 2019, pp. 477–513. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4938-5_17
37. Beklemishev N. N., Benevolenskii S. B., Istomina N. L., Kopylov P. V. Improvement of the accuracy of diffraction measurements of circuit feature sizes. *Russ. Microelectron.*, 1998, vol. 27, iss. 6, pp. 386–388.
38. Allgair J. A., Benoit D. C., Drew M. (Jr.), Hershey R. R., Litt L. C., Herrera P. P., Whitney U. K., Guevremont M., Levy A., Lakkapragada S. Implementation of spectroscopic critical dimension (SCD) (TM) for gate CD control and stepper characterization. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XV*, 2001, vol. 4344, art. ID: 436771. <https://doi.org/10.1117/12.436771>
39. Chen X., Shi Y., Jiang H., Zhang Ch., Liu Sh. Nondestructive analysis of lithographic patterns with natural line edge roughness from Mueller matrix ellipsometric data. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 388, pp. 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.167>
40. Lin C.-H., Huang C., Hsu C.-L., Sie W.-S., Wu J. Y., Bert Lin C.-H., Xu Zh.-Q. J., Yuan Q.-Y., Yoo S., Huang C.-J. E. et al. Fast and accurate scatterometry metrology method for STI CMP step height process evaluation. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI*, 2012, vol. 8324, art. ID: 832421. <https://doi.org/10.1117/12.916235>
41. Charley A.-L., Leray Ph., Pypen W., Cheng Sh., Verma A., Mattheus Ch., Wisse B., Cramer H., Niesing H., Kruijswijk S. High speed optical metrology solution for after etch process monitoring and control. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII*, 2014, vol. 9050, art. ID: 90501H. <https://doi.org/10.1117/12.2047280>

42. Dasari P., Li J., Hu J., Liu Zh., Kritsun O., Volkman C. Metrology characterization of spacer double patterning by scatterometry. *Proc. SPIE Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV*, 2011, vol. 7971, art. ID: 797111. <https://doi.org/10.1117/12.879900>

43. Schmidt D., Petrillo K., Breton M., Fullam J., Koret R., Turovets I., Cepler A. Advanced EUV resist characterization using scatterometry and machine learning. *2021 32nd Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC)*. Milpitas, CA, IEEE, 2021, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ASMC51741.2021.9435698>

44. El Kodadi M., Soulan S., Besacier M., Schiavone P. Real time scatterometry for profile control during resist trimming process. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2009, vol. 27, iss. 6, pp. 3232–3237. <https://doi.org/10.1116/1.3256594>

45. Raymond Ch. J., Murnane M. R., Prins S. L., Sohail S., Naqvi H., McNeil J. R., Hosch J. W. Multiparameter grating metrology using optical scatterometry. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1997, vol. 15, iss. 2, pp. 361–368. <https://doi.org/10.1116/1.589320>

46. Buckner B. D., Hirleman E. D. Deep-ultraviolet scatterometry for nanoparticle detection. *Proc. SPIE. Process Control and Diagnostics*, 2000, vol. 4182, art. ID: 410083. <https://doi.org/10.1117/12.410083>

47. Ito Y., Higuchi A., Omote K. Characterization of cross-sectional profile of resist L/S and hole pattern using CD-SAXS. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXX*, 2016, vol. 9778, art. ID: 97780L. <https://doi.org/10.1117/12.2218983>

48. Wang C., Choi K.-W., Chen Y.-C., Price J., Ho D. L., Jones R. L., Soles Ch., Lin E. K., Wu W.-L., Bunday B. D. Nonplanar high-k dielectric thickness measurements using CD-SAXS. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIII*, 2009, vol. 7272, art. ID: 72722M. <https://doi.org/10.1117/12.813757>

49. Jones R. L., Soles Ch. L., Lin E. K., Hu W., Reano R. M., Pang S. W., Weigand S. J., Keane D. T., Quintana J. P. Pattern fidelity in nanoimprinted films using CD-SAXS. *Proc. SPIE. Emerging Lithographic Technologies IX*, 2005, vol. 5751, art. ID: 600267. <https://doi.org/10.1117/12.600267>

50. Vaid A., Yan B. B., Jiang Y. T., Kelling M., Hartig C., Allgair J., Ebersbach P., Sendelbach M., Rana N., Katnani A. et al. A holistic metrology approach: Hybrid metrology utilizing scatterometry, CD-AFM, and CD-SEM. *Proc. SPIE. Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV*, 2011, vol. 7971, art. ID: 797103. <https://doi.org/10.1117/12.881632>

The review was submitted 19.12.2022; approved after reviewing 09.01.2023;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Ilya V. Nelyubin – PhD student of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), nelyubin.iv@mail.ru

Michail G. Putrya – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ftdek@miee.ru

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>

Разработка и исследование перфорированных структур для газовых электронных умножителей на базе фольгированных полиимидных пленок

Ю. Н. Касумов^{1,2}, Н. Е. Пухаева^{2,3}, С. А. Мовчан³,
И. Н. Гончаров^{1,2}, В. В. Урумов^{1,2}

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия

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

³Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

goncharov-scgtu@mail.ru

Аннотация. В последние десятилетия возросли требования к координатным детекторам по таким параметрам, как пространственное и временное разрешение, загрузочная способность, радиационная стойкость, возможность получения детекторов большой площади. Этим требованиям в значительной степени удовлетворяет газовый электронный умножитель. В работе приведены результаты исследований изготовленных перфорированных структур для создания газовых электронных умножителей методом химического травления с использованием отечественных фольгированных полиимидных пленок. Показана возможность получения системы сквозных отверстий на фольгированных полиимидных пленках с адгезивным подслоем. Представлены результаты исследований электронной усилительной способности разработанных структур, проведенных с использованием специально изготовленной экспериментальной ячейки. Полученные образцы с размерами активной зоны 10×10 мм и с коэффициентом усиления более 200, типичным для структур с цилиндрическими каналами без диэлектрических колец, продемонстрировали свою работоспособность. Суммарная толщина диэлектрического слоя структур составляет около 100 мкм, диаметр отверстий равен 70 мкм с шагом 140 мкм.

Ключевые слова: газовый электронный умножитель, перфорированные структуры, полиимидная пленка, электронная усилительная способность, фотолитография, химическое травление, адгезионный слой

Для цитирования: Разработка и исследование перфорированных структур для газовых электронных умножителей на базе фольгированных полиимидных пленок // Ю. Н. Касумов, Н. Е. Пухаева, С. А. Мовчан и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 326–336. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-326-336>. – EDN: UPGVBX.

Original article

Production and research of perforated structures for gas electronic multipliers based on foil-clad polyimide films

Yu. N. Kasumov^{1,2}, N. E. Puhaeva^{2,3}, S. A. Movchan³,
I. N. Goncharov^{1,2}, V. V. Urumov^{1,2}

¹North Caucasian Institute of Mining and Metallurgical
(State Technological University), Vladikavkaz, Russia

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

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

goncharov-scgtu@mail.ru

Abstract. In recent decades, the requirements for coordinate detectors have increased in terms of such parameters as spatial and temporal resolution, loading capacity, radiation resistance, and the possibility of obtaining large-area detectors. All these requirements are largely satisfied by the gas electronic multiplier. In this work, the results of research on the production of perforated structures necessary for gas electronic multipliers manufacturing by chemical etching using domestic foil-clad polyimide films, are presented. The possibility is shown of obtaining a system of through holes on foil-clad polyimide films with an adhesive sublayer. The results of studies of the electronic amplification capability of the obtained structures conducted using a specially manufactured experimental cell are presented. The obtained samples with active zone dimensions 10×10 mm and with amplification coefficient $K \geq 200$ typical for structures with cylindrical channels without dielectric rings, have demonstrated their operational integrity. Cumulative thickness of the structures' dielectric layer is about 10 μm , hole diameter is 70 μm at 140 μm intervals.

Keywords: gas electron multiplier, perforated structures, polyimide films, electronic amplification, photolithography, chemical etching, adhesive layer

For citation: Kasumov Yu. N., Puhaeva N. E., Movchan S. A., Goncharov I. N., Urumov V. V. Production and research of perforated structures for gas electronic multipliers based on foil-clad polyimide films. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 326–336. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-3-326-336](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-326-336). – EDN: UPGBBX.

Введение. Газовый электронный умножитель (ГЭУ) предназначен для усиления электронного потока в специальной структуре, пронизанной идентичными микроотверстиями, в условиях газовой среды под влиянием электрического поля высокой напряженности [1, 2]. Это позволяет использовать его в составе датчика ионизирующего излучения, способствующего возникновению первичного электронного потока в приемной части ГЭУ, пропорционального по интенсивности внешнему ионизирующему воздействию. ГЭУ представляет собой тонкую диэлектрическую полиимидную пленку марки Картон толщиной ~ 50 мкм, покрытую с обеих сторон медной фольгой толщиной ~ 5 мкм, с регулярными сквозными отверстиями диаметром от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. Обычно отверстия в сечении имеют форму

двойного конуса и расположены друг от друга на расстоянии от сотни до тысячи микрометров [3].

Электроны, появившиеся в результате ионизирующего излучения в газовом промежутке перед ГЭУ, дрейфуют вдоль силовых линий и фокусируются в отверстия, в которых под действием сильного электрического поля в условиях газового разряда умножаются и образуют электронные лавины. При подаче напряжения (до 300–500 В) между обкладками внутри отверстий создается высокая напряженность электрического поля, достаточная для возникновения условий газового усиления, т. е. значительного увеличения количества электронов, первично созданных заряженной частицей в дрейфовом промежутке детектора. В результате может быть зарегистрирована частица с высокой эффективностью. Таким образом, каждое отверстие представляет собой независимый пространственно-распределенный счетчик электронов. Далее возникшие в ГЭУ электронные лавины проходят индукционный промежуток и попадают на секционированный анод.

При определенном выборе прикладываемых напряжений практически все первичные электроны, дрейфуя вдоль силовых линий, фокусируются внутри отверстий ГЭУ (эффект воронки), испытывают газовое усиление и собираются на аноде, т. е. сигнал на считывающем электроде формируется за счет сбора электронов [4]. Технологические сложности получения безадгезионных фольгированных полиимидных пленок и их обработки обусловили появление доступного для изготовления «толстого» газового умножителя на базе фольгированного стеклотекстолита, отверстия в котором получают механическим сверлением. При этом размер и шаг следования отверстий намного уступают «тонким» газовым умножителям на базе фольгированного полиимида [5].

Цель настоящей работы – исследование возможности получения множества отверстий (несколько тысяч на квадратный сантиметр) в диэлектрическом слое металлизированных пленок для ГЭУ-детекторов с применением методов фотолитографии и жидкостного химического травления пленок полиимида.

Постановка задачи. Эффективность усиления структуры зависит от формы отверстия в диэлектрическом слое, которая, в частности, определяет конфигурацию ускоряющего электрического поля, формируемого в ГЭУ (рис. 1). В работах [1, 4] отмечается, что оптимальной формой является двойной конус, сформированный в диэлектрической подложке, в качестве которой можно использовать полиимидную пленку Картон, характеризующуюся высокими диэлектрическими свойствами, стабильными в диапазоне температур от -273 до $+400$ °С, и низким уровнем дегазации.

Для решения поставленной задачи необходимо:

- подобрать реактивы и режимы для травления полиимидного и адгезионного слоев;
- изучить влияние режимов травления на форму получаемых отверстий в пленках фольгированных диэлектриков;
- изготовить структуры;
- измерить электронно-усилительные свойства структур с разработкой и изготовлением соответствующего оборудования.

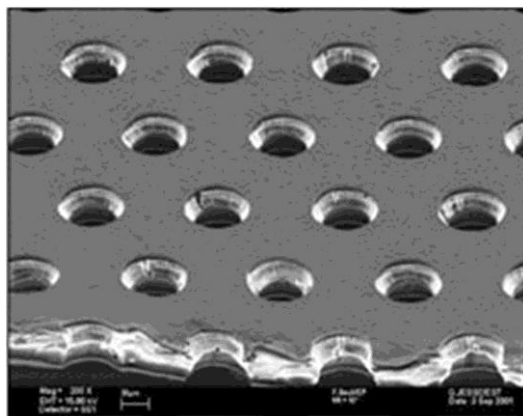


Рис. 1. Разрез полиимидной пленки с медным покрытием

Fig. 1. Section of the polyimide film with copper coating

Обзор существующих ГЭУ-технологий. Известно, что за рубежом структуры ГЭУ получают на основе полиимидных пленок с безадгезионным двухсторонним покрытием медью типа DuPont Pugalux. Отечественная промышленность выпускает только одно-сторонне фольгированные диэлектрические полиимидные пленки с адгезионным слоем, сцепляющим между собой металлическую фольгу и полиимид (адгезионные материалы), и безадгезионные. Материалы отечественного производства с двухсторонним покрытием медной фольгой представлены только адгезионными структурами. В связи с этим возникает вопрос о сравнении уровня технологичности изготовления и эффективности работы детекторов, созданных из адгезионных и безадгезионных фольгированных диэлектриков.

Преимущество адгезионных структур – в их лучшей несущей способности, обеспечиваемой жесткостью адгезионного слоя, что позволяет уменьшить прогиб при их больших размерах и облегчить последующие монтажные работы (жесткость тонкого полиимидного слоя незначительна). Но при использовании структур возникает необходимость в травлении полиимидного слоя и еще двух адгезионных слоев (между металлическим и полиимидным с каждой стороны пленки). Полиимидный слой в фольгированных пленках от разных изготовителей может быть частично имидизированным, т. е. поддающимся травлению, и полностью имидизированным – химически инертным.

В работе [1] описано использование материала фирмы DuPont, представляющего собой полиимидную пленку с двухсторонним покрытием медной фольгой, в которой методом фотолитографии в медном слое вытравлены отверстия. Сквозь них проведено травление полиимидной пленки в концентрированных неорганических щелочах, либо в растворах гидразингидрата $N_2H_4 \cdot H_2O$, которые разрушают полиимид быстрее, чем щелочи, либо в щелочных растворах этилендиамина $C_2H_8N_2$, где скорость травления выше, чем в гидразингидратах. Травление проведено при температурах 120–140 °С. При этом необходимо учитывать, что гидразингидрат и этилендиамин – токсичные вещества с температурой кипения порядка 118 °С.

Для увеличения скорости травления может применяться щелочной раствор моноэтаноламина C_2H_7NO с добавлением тетраалкиламмониевых оснований (тетраметиламмоний гидрат CH_3_4NOH либо тетрабутиламмоний гидрат $C_4H_9_4NOH$). Температура раствора ~ 100 °С [6]. Обработка в органических щелочах приводит к изотропному травлению отверстий, а в неорганических – к анизотропному, что способствует появлению конусообразного профиля отверстий (одно- и двухстороннего – в зависимости от направления воздействия раствора), более предпочтительного для достигаемого коэффициента усиления структуры. Однако известно [1], что профиль вызывает временную нестабильность усиления из-за повышенной по сравнению с цилиндрическими отверстиями зарядкой стенок диэлектрика при работе детектора.

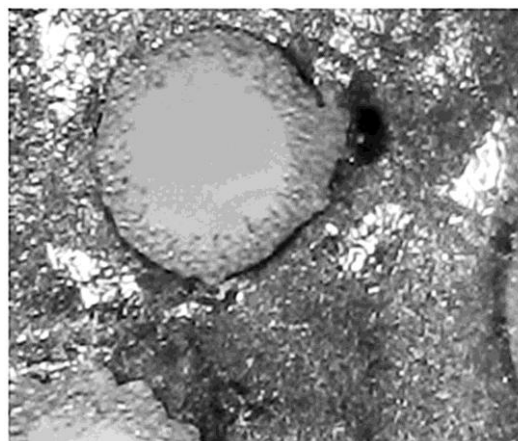


Рис. 2. Результат травления полиимидного слоя безадгезионного материала (диаметр вытравленных сквозных отверстий ~ 200 мкм)

Fig. 2. The result of etching a polyimide layer of a non-adhesive material (etched through holes diameter is ~ 200 μm)

В настоящей работе для получения системы отверстий в пленках химическим способом использовали материалы от отечественных производителей с частично имидизированным слоем [4]. Результаты исследования этих материалов показали, что при травлении отверстий в полиимиде для безадгезионных пленок с односторонним ламинированием медью вытравленные отверстия негладкие. Наблюдается «ожерелье» из гранул полиимида (рис. 2).

Для получения структур из двухсторонних фольгированных полиимидных пленок с адгезионными слоями использовали два образца: образец № 1 с толщиной слоев меди по 35 мкм, адгезионных слоев 25 мкм, полиимидного слоя 40 мкм и образец № 2 с толщиной слоев меди по 18 мкм, адгезионных слоев 25 мкм, полиимидного слоя 50 мкм. В работе [7] описано травление материалов, содержащих аналогичные эпоксидно-каучуковые адгезивы. В частности, для ускорения травления структуры рекомендуется проводить процедуру ее предварительного набухания в растворах, содержащих диметилформамид $C_3H_7NO(CH_3)_2NC(OH)$ и диметилсульфоксид C_2H_6OS .

Исследование технологических подходов к получению структуры. Листовые материалы фольгированных пленок нарезали на квадраты 30×30 мм, которые проходили обезжиривание при температуре $36^\circ C$ в 30%-ном водном растворе моноэтаноламина в ультразвуковой ванне с последующей промывкой в проточной воде. Поверхность меди подвергали декапированию в 10%-ном растворе серной кислоты в течение 30 с. Далее осуществляли промывку в проточной воде в течение 1 мин и микротравление в персульфате аммония $(NH_4)_2S_2O_8$, затем – промывку в проточной воде в течение 1 мин и сушку в термошкафу в течение 1 ч при температуре $70^\circ C$.

В последующем на образцы наносили слой позитивного аэрозольного фоторезиста Позитив-20 и после сушки при температуре $70^\circ C$ в течение 1 ч их экспонировали ультрафиолетовым излучением с двух сторон через фотосаблон. При этом формировалась активная область структуры 10×10 мм ГЭУ-детектора. Полученная структура представляет собой повторяющиеся ряды отверстий диаметром 75 мкм с шагом 150 мкм. После экспонирования фоторезист проявляли в 1%-ном растворе гидроксида натрия NaOH. Структуру промывали в проточной воде и направляли для последующей обработки – травления медного слоя под вскрывшимися отверстиями в фоторезисте (задубливание фоторезиста не проводили).

Медь с фольгированных пленок стравливали в растворе хлорида меди в соответствии с методиками, приведенными в работе [8]. Прозрачность раствора позволила визуально контролировать на просвет процесс удаления меди. После удаления меди образец промывали в проточной воде, удаляли фоторезист в 3%-ном растворе NaOH, далее вновь промывали в проточной воде и подсушивали при температуре $60^\circ C$ в термостате. Недостаток метода состоит в том, что при промывке заготовки происходит гидролиз, а образующийся шлам может незначительно нарушить целостность структур.

Следующий этап – травление адгезионного слоя структуры. Проверяли эффективность травителей на основе концентрированных серной и хромовой кислот. Предпочтение отдано серной кислоте: раствор прозрачен, возможен визуальный контроль, в ходе травления не подвергаются воздействию внешние медные покрытия – электроды ГЭУ-пластины. Для проверки скорости травления адгезионного слоя с образцов частично стравливали сохраненный на предыдущем этапе слой меди, чтобы открыть адгезионный подслой для удобства наблюдения за процессом его травления.

На рис. 3 представлен результат взаимодействия адгезионного слоя с концентрированной серной кислотой плотностью 1,4 г/мл, с предварительным набуханием этого слоя в растворе, содержащем 50 % C_2H_6OS и 50 % этилового спирта при температуре 30 °С в течение 40 с. Более быстрое травление адгезионного эпоксидно-каучукового слоя возможно при предварительной обработке в растворе, содержащем 50 % этилового спирта и 50 % C_2H_6OS , что приводит к ускоренному набуханию данного стравливаемого слоя. Из рисунка видно, что удаление материала идет не послойно, а «комочками», затрудняющими удаление материала из отверстий.

Эксперименты показали, что при травлении адгезионного слоя может наблюдаться образование приподнятых над поверхностью волнообразных складок медной фольги. Процесс образования складок активизируется с увеличением скорости травления за счет повышения температуры травителя до 50–60 °С. Отслоение фольги, вероятно, обусловлено проникновением растворов для набухания и травления в глубь материала, в стенки отверстий. В качестве меры, уменьшающей интенсивность данного явления, снижали температуру травления до 32–36 °С.

Несмотря на то что в образцах № 1 и 2 в качестве адгезионного материала использован эпоксидно-каучуковый подслоя, при его травлении результаты оказались разными: на образце № 1 часто отслаивалась фольга при травлении адгезионного подслоя, вследствие чего работа с данным материалом была прекращена; на образце № 2 при травлении адгезионного слоя не было интенсивной красной окраски, по мере травления раствор приобретал желтый цвет. Для улучшения удаления продуктов реакции и уменьшения бокового травления каналов периодически промывали структуру в ультразвуковой ванне в воде той же температуры, что и травитель, контролируя на просвет цвет и прозрачность диэлектрического слоя. На рис. 4 показан результат удаления посредством травления адгезионного слоя с образца № 2.

Завершающая стадия получения структуры – травление полиимидного слоя. Результаты изучения литературных источников, в частности [7], показали, что для травления данного полимера целесообразнее использовать раствор моноэтаноламина C_2H_7NO с гидроксидом калия КОН. Такой состав может травить полиимид при температуре ~ 80 °С, это эффек-

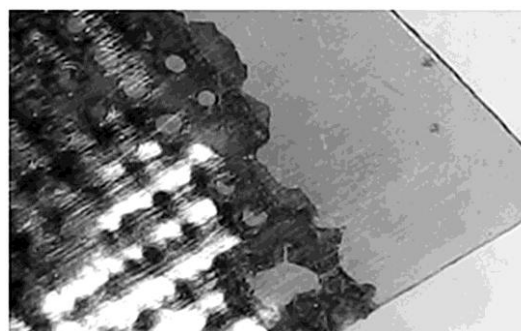


Рис. 3. Структура после взаимодействия адгезионного слоя с серной кислотой (светлые области – полиимид; темные области – адгезионный слой с круглыми вытравленными отверстиями)

Fig. 3. The structure after the interaction of the adhesive layer with H_2SO_4 (light area – polyimide; dark area – adhesive layer with round etched holes)

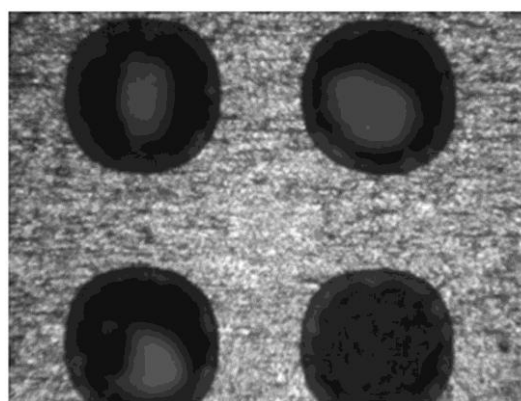


Рис. 4. Вскрытые адгезионные слои структур (образец № 2)

Fig. 4. The opened adhesive layers of structures (specimen 2)

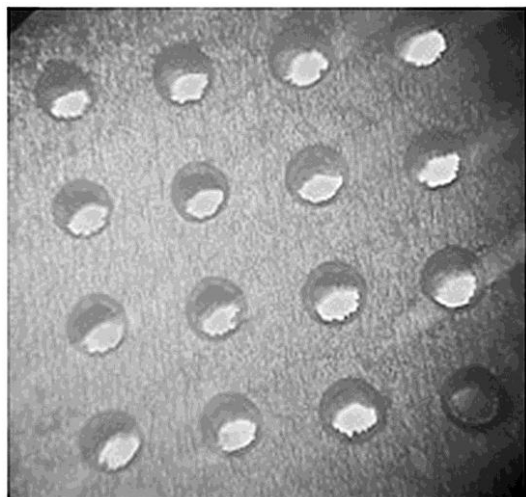


Рис. 5. Сквозные отверстия в фольгированной полиимидной пленке с адгезионным подслоем
Fig. 5. Through holes in foiled polyimide film with adhesive sublayer

тивно по сравнению с другими составами, работающими при температурах выше 130 °С, критичных для адгезионных пленок. Пленки, прошедшие травление адгезионного слоя, после промывки в проточной воде поступали на травление полиимидного слоя в растворе, содержащем 90 % моноэтаноламина и 10 % КОН. Таким образом, удалось получить сквозные отверстия в многослойной пленочной структуре (рис. 5).

Оценка усилительной способности полученной структуры умножителя. Изготовленные структуры подвергали испытанию на электронно-усилительную способность для определения возможности их использования в качестве датчиков ионизирующего излучения. Разработана и изготовлена специальная ячейка, в которой распо-

лагается исследуемый образец. В соответствии со схемой, представленной на рис. 6, ячейка снабжена системой электродов для подачи требуемого электрического напряжения на ГЭУ-структуру, а также на катод – источник первичных электронов и анод – коллектор для приема усиленного электронного потока. В ячейке предусмотрена система подачи газа рабочей среды – смеси аргона и углекислоты.

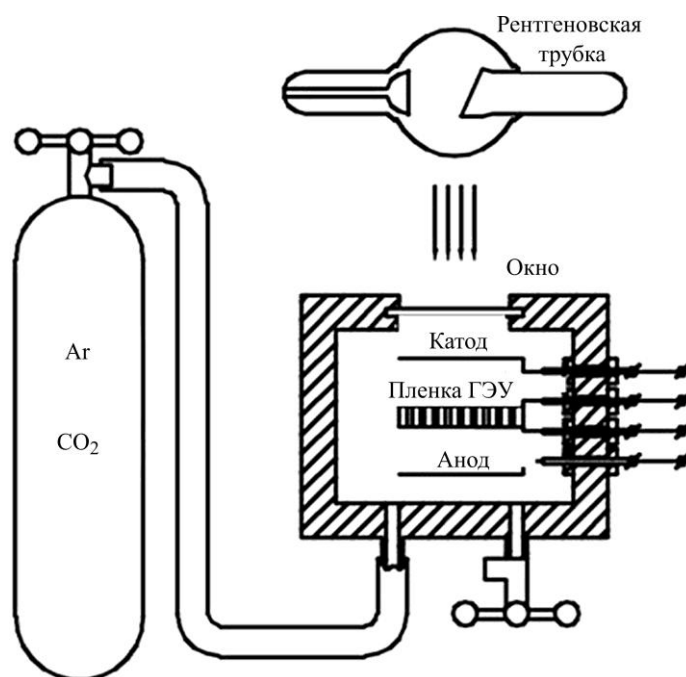


Рис. 6. Схема для измерения усилительных свойств структур ГЭУ
Fig. 6. Scheme for measuring the amplifying properties of gas electronic multiplier structures

В качестве катода использовали металлическую пластину с отверстиями, облегчающими заполнение рабочей газовой смесью межэлектродного пространства ячейки. Кроме того, отверстия способствуют проникновению рентгеновского излучения в ка-

меру, непосредственно в дрейфовый промежуток. Под катодом на расстоянии 6 мм располагалась исследуемая структура, а под ней на расстоянии 2 мм – сплошной анод из медной фольги на текстолитовом основании. Прикатодная область ячейки для подачи ионизирующего излучения со стороны входного окна расположена рядом с рентгеновской установкой УРС-60, содержащей рентгеновскую трубку с медным анодом. Энергия квантов излучения равна 8 кэВ.

Электропитание системы осуществлялось от стабилизированных источников. Токи определяли с использованием электрометрического усилителя У5-б с высоким входным сопротивлением по величине падения напряжения на образцовом сопротивлении. Подаваемая в ячейку рабочая газовая смесь содержала 85 % Ag и 15 % CO₂. В качестве катода использовали проволочную латунную сетку высокой прозрачности. Индукционный зазор, равный 3 мм, обеспечивал при подаваемом между электродами напряжении 800 В достаточную напряженность поля в дрейфовом промежутке. На рис. 7 проиллюстрирована зафиксированная в данном эксперименте усилительная способность полученной структуры.

Следует отметить, что достигнутый коэффициент усиления, составляющий ~ 200 раз, относительно мал по сравнению с коэффициентом усиления ~ 1000 известных аналогов ГЭУ. Это может объясняться тем, что полученная в процессе травления форма каналов в полиимиде не коническая, а цилиндрическая. Известно [1, 4], что именно коническая форма обеспечивает рост коэффициента усиления ~ 1000. Однако установлено, что цилиндрическое сечение при относительно низком усилении обеспечивает высокую стабильность процессу усиления. Значительному росту усилительной способности каналов цилиндрического сечения также способствует наличие вокруг каналов диэлектрических колец. В работе [4] отмечено, что они могут обеспечивать более высокое усиление таких структур во время работы из-за меньшего накопления заряда на выступающих диэлектрических элементах каналов. Диэлектрические кольца вокруг каналов цилиндрической формы могут компенсировать отсутствие двойного конического сечения. Они имитируют диэлектрический выступ, обуславливающий образование оптимальных по форме и достаточно плотных силовых линий электрического поля в области каналов, что способствует росту коэффициента электронного усиления. Дальнейшие действия для достижения роста усилительной способности структуры при условии ее высокой стабильности – формирование диэлектрических колец вокруг каналов цилиндрической формы.

Заключение. Разработанные перфорированные структуры из фольгированных полиимидных пленок с адгезионным подслоем для ГЭУ имеют следующие характеристики: размер активной зоны 10 × 10 мм; коэффициент усиления более 200 (типичный для структур с цилиндрическими каналами без диэлектрических колец); суммарная толщина диэлектрического слоя структур около 100 мкм; диаметр отверстий 70 мкм с шагом 140 мкм. Данные структуры продемонстрировали свою работоспособность.

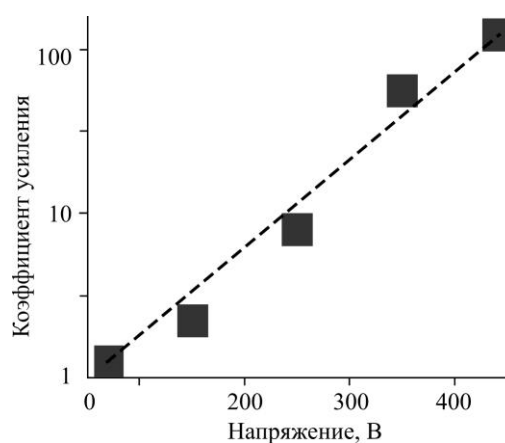


Рис. 7. Типичная зависимость коэффициента усиления перфорированных структур от приложенного напряжения

Fig. 7. Typical dependence of the gain of the obtained perforated structures on the applied voltage

В дальнейшем планируется разработать технологию получения диэлектрических колец в структурах с цилиндрическими каналами, имеющими повышенные электронно-усилительные свойства (коэффициент усиления более 1000).

Литература

1. **Sauli F.** The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. Vol. 805. P. 2–24. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.060>
2. **Маланкин Е. З.** Адаптивные тракты КМОП интегральных микросхем для многоканальных газовых электронных умножителей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 125 с.
3. **Oliveira R., Peskov V., Pietropaolo F., Picchi P.** First tests of MICROMEAS and GEM-like detectors made of a resistive mesh // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. Vol. 57. Iss. 6. P. 3744–3752. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2073483>
4. Исследование координатных газовых детекторов для мюонной трековой системы эксперимента СВМ на основе технологий GEM и TGEM / Э. В. Аткин, С. С. Волков, А. Г. Воронин и др. // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 2. С. 32–40. <https://doi.org/10.7868/S0032816215010267>
5. **Разин В. И.** Толстый газовый электронный умножитель // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 2. С. 28–31. <https://doi.org/10.31857/S0032816220020172>
6. Пат. 2295846 РФ. Способ производства полупроводниковых систем на полиимидном основании / Г. Ш. Комарова, Е. А. Комаров; заявл. 20.09.2005; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8. 5 с.
7. **Брусницына Л. А., Алексева Т. А., Степановских Е. И.** Особенности травления эпоксилаучкового адгезивного слоя на поверхности диэлектрика // Бутлеровские сообщения. 2018. Т. 54. № 5. С. 90–97. EDN XPQENZ.
8. **Брусницына Л. А., Степановских Е. И.** Технология изготовления печатных плат. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 196 с.

Статья поступила в редакцию 20.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 27.12.2022 г.; принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Касумов Юрий Надирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (Россия, 362021, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), старший научный сотрудник лаборатории ядерных исследований Северо-Осетинского государственного университета имени К. Л. Хетагурова (Россия, 362025, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46), kasumov60@mail.ru

Пухаева Нелли Ефимовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики конденсированного состояния Северо-Осетинского государственного университета имени К. Л. Хетагурова (Россия, 362025, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46), ведущий научный сотрудник Информационного центра Объединенного института ядерных исследований (Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Академика Балдина, 4), nelli.pukhaeva@gmail.com

Мовчан Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, начальник сектора №1 научно-экспериментального отдела многоцелевого детектора Объединенного института ядерных исследований (Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Академика Балдина, 4), movchansa@yandex.ru

Гончаров Игорь Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронных приборов Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (Россия, 362021, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), заведующий лабора-

торией ядерных исследований Северо-Осетинского государственного университета имени К. Л. Хетагурова (Россия, 362025, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46), goncharov-scgtu@mail.ru

Урумов Владимир Владимирович – аспирант кафедры электронных приборов Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (Россия, 362021, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), младший научный сотрудник лаборатории ядерных исследований Северо-Осетинского государственного университета имени К. Л. Хетагурова (Россия, 362025, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46), m.o.r.b.i.u.s@mail.ru

References

1. Sauli F. The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2016, vol. 805, pp. 2–24. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.060>
2. Malankin E. Z. *Adaptive paths of CMOS integrated microcircuits for multichannel gas electron multipliers*, diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Moscow, 2018. 125 p. (In Russian).
3. Oliveira R., Peskov V., Pietropaolo F., Picchi P. First tests of MICROMEAS and GEM-like detectors made of a resistive mesh. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2010, vol. 57, iss. 6, pp. 3744–3752. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2073483>
4. Atkin E. V., Volkov S. S., Voronin A. G., Ivanov V. V., Komkov B. G., Kudin L. G., Malankin E. Z., Nikulin V. N. et al. A study of the coordinate gas-filled detectors based on the GEM and TGEM technologies for the muon tracking system of the CBM experiment. *Instrum. Exp. Tech.*, 2015, vol. 58, iss. 2, pp. 197–205. <https://doi.org/10.1134/S0020441215010248>
5. Razin V. I. A thick gas electron multiplier. *Instrum. Exp. Tech.*, 2020, vol. 63, iss. 2, pp. 161–164. <https://doi.org/10.1134/S0020441220020153>
6. Komarova G. Sh., Komarov E. A. *Method for manufacturing semiconductor systems on polyimide base*. Patent 2295846 RF, publ. 20.03.2007, Bul. no. 8. 5 p. (In Russian).
7. Brusnitsina L. A., Alekseeva T. A., Stepanovskikh E. I. Features epoxy-rubber adhesive layer on the dielectric surface. *Butlerovskiyе soobshcheniya = Butler Communications*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 90–97. (In Russian). EDN XPQEHZ.
8. Brusnitsyna L. A., Stepanovskikh E. I. *Printed circuit board manufacturing technology*. Ekaterinburg, Ural Univ. Publ., 2015. 196 p. (In Russian).

The article was submitted 20.12.2022; approved after reviewing 27.12.2022;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Yuri N. Kasumov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Physics Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (Russia, 362021, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st., 44), Senior Scientific Researcher of the Nuclear Research Laboratory, North Ossetian State University named after K. L. Khetagurov (Russia, 362025, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Vatutin st., 44-46), kasumov60@mail.ru

Nelly E. Pukhaeva – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Condensed Matter Physics Department, North Ossetian State University named after K. L. Khetagurov (Russia, 362025, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Vatutin st., 44-46), Leading Scientific Researcher of the Information Center, Joint Institute for Nuclear Research (Russia, 141980, Moscow region, Dubna, Academician Baldin st., 4), nelli.pukhaeva@gmail.com

Sergey A. Movchan – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Sector No. 1, Scientific and Experimental Department of the Multipurpose Detector, Joint Institute for Nuclear

Research (Russia, 141980, Moscow region, Dubna, Academician Baldin st., 4),
movchansa@yandex.ru

Igor N. Goncharov – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof. of the Electronic Devices Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (Russia, 362021, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st., 44), Head of the Nuclear Research Laboratory, North Ossetian State University named after K. L. Khetagurov (Russia, 362025, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Vatutin st., 44-46), goncharov-scgtu@mail.ru

Vladimir V. Urumov – PhD student of the Electronic Devices Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (Russia, 362021, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st., 44), Junior Scientific Researcher of the Nuclear Research Laboratory, North Ossetian State University named after K. L. Khetagurov (Russia, 362025, Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, Vatutin st., 44-46), m.o.r.b.i.u.s@mail.ru

Уважаемые авторы и читатели!

Вышли в свет журналы

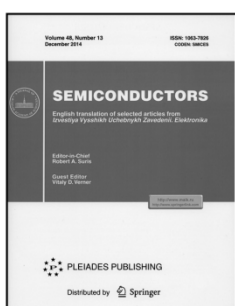
RUSSIAN MICROELECTRONICS

Vol. 51, No. 7, 2022. - ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,

SEMICONDUCTORS

Vol. 56, No. 13, 2022. - ISSN PRINT: 1063-7826,
ISSN ONLINE: 1090-6479,

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



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

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья

УДК 621.3.049.77:544.541

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-3-337-350

EDN: UPFDOT

Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве II. Выбор объектов испытаний и статистическая обработка результатов контроля

Ю. М. Московская^{1,2,3}, Д. В. Бойченко^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия

²АО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва, Россия

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

ytmos@spels.ru

Аннотация. Требования к радиационной стойкости изделий необходимо подтверждать в серийном производстве на каждой партии пластин. Базовый технологический процесс должен быть управляемым, чтобы гарантировать точность и стабильность всех заявленных параметров изделия, в том числе радиационной стойкости. Разработки системы мониторинга и статистического регулирования базового технологического процесса ведутся на основании данных, полученных в ходе радиационно-ориентированной характеристики базового технологического процесса или во время предварительных испытаний в процессе разработки изделия. На каждом этапе изготовления используются соответствующие тестовые структуры для прогнозной оценки радиационной стойкости изделия. В работе по результатам анализа инженерной практики и литературных данных предложен состав тестовых структур для контроля технологического процесса на примере КМОП КНИ 250 нм, отвечающий требованиям по радиационной стойкости. Статистическая обработка данных мониторинга производственных партий пластин направлена на проверку степени отклонения текущей партии от базовой группы, которая выбрана в качестве эталонной. Объем выборки составляет всего 3 шт., поэтому предложено оценивать однородность производственных партий с помощью непараметрических статистических критериев оценивания. Рассмотренный подход позволяет гарантировать радиационную стойкость за счет управляемости и стабильности базового технологического процесса, что способствует минимизации технико-экономических затрат и объема радиационных испытаний.

© Ю. М. Московская, Д. В. Бойченко, 2023

Ключевые слова: радиационная стойкость, базовый технологический процесс, статистический контроль, тестовые структуры, партии пластин, непараметрические статистические критерии

Для цитирования: Московская Ю. М., Бойченко Д. В. Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве. II. Выбор объектов испытаний и статистическая обработка результатов контроля // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 337–350. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-337-350>. – EDN: UPFDOT.

Original article

Prediction analysis of the microcircuits' radiation hardness within fabrication process

II. Test objects choice and the obtained results statistical processing

Yu. M. Moskovskaya^{1,2,3}, D. V. Boychenko^{1,2}

¹National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²“ENPO SPELS” JSC, Moscow, Russia

³SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia

Y.Moskovskaya@tcen.ru

Abstract. Radiation hardness assurance for microelectronics in general is mandatory for every wafer lot. Core manufacturing process should be controllable to ensure accuracy and stability of all stated parameters of the given product including its radiation hardness. Monitoring and statistical regulation method for core manufacturing process is developed based on data acquired from either radiation-oriented characterization of this process or preliminary tests during product development. On each fabrication step the corresponding test structures are used for predictive estimation of the product's radiation hardness. In this work, based on both engineering and periodical data a set of test structures suitable for core manufacturing process control is proposed, using the example of the 250 nm CMOS SOI technology and fulfilling radiation hardness requirements. Statistical processing of the monitoring data for wafer lots is oriented to verify the degree of current lot deviation from basic lot chosen as standard for comparison. However, because lot size is small (3 pcs) it has been proposed to evaluate lot homogeneity with nonparametric statistical criteria. The considered approach makes it possible to guarantee required radiation hardness through core manufacturing process controllability and stability which allows for less economic value and tests volume minimization.

Keywords: radiation hardness, core manufacturing process, statistical control, test structures, wafer lots, nonparametric statistical criteria

For citation: Moskovskaya Yu. M., Boychenko D. V. Prediction analysis of the microcircuits' radiation hardness within fabrication process. II. Test objects choice and the obtained results statistical processing. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 337–350. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-337-350>. – EDN: UPFDOT.

Введение. На сегодняшний день контроль радиационной стойкости производственных партий пластин на этапе изготовления часто проводится неэффективно, без учета вклада особенностей базового технологического процесса в обеспечение требуемого уровня стойкости. Настоящая работа является продолжением работы [1], в которой предложен подход к обеспечению прогнозного контроля стабильности радиационной стойкости изделий микроэлектроники в процессе производства с учетом категории радиационной стойкости каждого типа микросхем. Это гарантирует необходимую полноту, достоверность и информативность контроля при минимизации технико-экономических затрат и объема радиационных испытаний.

Обеспечение в серийном производстве высокого процента выхода годных изделий, качества, стабильности характеристик, в том числе радиационной стойкости (РС), достигается статистической управляемостью базового технологического процесса (БТП). С целью реализации управляемости разрабатывается система статистического регулирования БТП, задача которой – мониторинг состояния параметров БТП, обеспечивающих качество выпускаемых изделий и выявление неслучайных вариаций параметров для принятия своевременного решения о необходимости регулировки условий и режимов технологических операций. Одной из значимых стадий разработки системы статистического регулирования БТП является обоснованный выбор объекта мониторинга.

Общий подход к выбору объекта статистического контроля базового технологического процесса по радиационной стойкости. Статистическая регулируемость БТП оценивается с помощью анализа результатов контроля тестовых структур (ТС) – параметрических мониторов (ПМ), которые, как правило, располагаются в дорожках реза, и структур контроля технологии (СКТ), размещаемых на специально отведенных областях пластины. Состав ТС и принципы их разработки изложены в научно-технической документации.

В процессе изготовления микросхем [2] ПМ должен обеспечивать оперативную и достоверную оценку электрофизических свойств элементов и структур, электрических параметров, качества выполнения технологических операций, РС. СКТ должна оценивать характеристики РС, которые связаны с особенностями влияния изменчивости БТП на параметры библиотечных элементов и функциональных блоков. В настоящее время для большинства БТП состав ТС разработан в соответствии с требованиями статистического регулирования БТП по воспроизводимости электрических параметров. Однако чувствительность изделий к радиационным эффектам не учитывается.

В случае если БТП потенциально ориентирован на разработку и производство электронной компонентной базы с требованиями по РС, он должен быть предварительно охарактеризован для определения типовых и предельных показателей РС изделий целевого функционального назначения, выявления доминирующих радиационных эффектов, возможных видов и механизмов радиационных отказов, идентификации параметров радиационно-ориентированных моделей библиотечных элементов, паразитных структур и их верификации по радиационным откликам функциональных блоков и критичных фрагментов, образующих вместе конструктивно-технологическую платформу для радиационно-ориентированного проектирования. В результате радиационно-ориентированной характеристики (РОХ) БТП разрабатываются ПМ и СКТ для демонстрации возможности обеспечить стабильное изготовление микросхем требуемого уровня РС в соответствии с научно-технической документацией на них.

В ходе разработки системы мониторинга и статистического регулирования БТП на основании данных, полученных в ходе РОХ, проводится комплекс мер по выявлению наиболее критичных базовых элементов (включаются в состав ПМ), библиотечных элементов, паразитных структур и фрагментов схем, а также функциональных блоков (включаются в состав СКТ) [3], определяется перечень критичных режимов и характер зависимостей критичных параметров от поглощенной дозы и мощности дозы. Перечисленные меры позволяют на этапе производства исключить неинформативные, избыточные контрольные операции и оптимизировать информативные операции.

Описание ПМ и СКТ входит в состав технологической документации на БТП и в части контроля РС включает в себя:

- состав и принципиальные схемы ТС, которые должны быть выбраны таким образом, чтобы наиболее полно описывать механизмы радиационных отказов и коррелировать с доминирующими радиационными эффектами;
- методики проведения испытаний, в том числе схемы включения и измерения электрических параметров в диапазоне температур и соотношения между измеряемыми предельными и ожидаемыми предельными значениями, полученными при моделировании микросхемы в ходе ее проектирования.

В технологической документации должны быть установлены браковочные границы и порядок измерения параметров. Разрабатывается план контроля, согласно которому определяют объекты контроля РС в процессе производства и конкретные методики (состав и методы измерения контролируемых параметров, которые являются радиационно-чувствительными, режимы и условия испытаний). Состав и нормы на контролируемые параметры устанавливаются в процессе разработки системы мониторинга с учетом результатов РОХ.

Отсутствие на сегодняшний день правил проведения предварительной РОХ БТП приводит к ситуации, когда недостающие фактические данные о БТП, необходимые на этапе проектирования, разработчик изделия вынужден получать непосредственно в ходе опытно-конструкторской работы (ОКР). Это приводит к непредсказуемым результатам испытаний опытных образцов на РС, например:

- требования в техническом задании на ОКР могут быть недостижимы для выбранного БТП;
- отказы по РС обусловлены изменением в БТП, последствия которого не учтены на этапе проектирования изделия за счет отсутствия адекватного прогнозирования (моделирования).

Последствия отсутствия РОХ можно проследить на примере БТП КНИ 250 нм, в ходе которого выпускаются следующие виды изделий микроэлектроники: микропроцессоры, контроллеры; цифровые СБИС; СБИС памяти оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), постоянного запоминающего устройства (ПЗУ); аналого-цифровые СБИС. Результаты анализа данных, полученные при испытаниях на стойкость к воздействию ионизирующего излучения (ИИ) выборки из партий изделий, разработанных разными дизайн-центрами и изготовленных в ходе БТП КМОП КНИ 250 нм, приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1. К доминирующим радиационным эффектам относятся: параметрический сбой – кратковременное изменение уровней выходного напряжения; функциональный сбой (в схемах с ячейками памяти) – отказ по записи-считыванию; сбой по реакции выходного кода (в АЦП). Катастрофические отказы, а также превышение заданного значения времени потери работоспособности не обнаружены в среднем до уровней $4,0 \cdot 10^{12}$ ед./с.

Таблица 1

Разбросы значений уровня бессбойной работы, полученных при испытаниях на стойкость к импульсному воздействию ИИ изделий, изготовленных в ходе БТП КМОП КНИ 250 нм

Table 1

Fail-safe work level parameter spread obtained at radiation impulse tolerance tests of products made on CMOS SOI 250 process

Вид ИС	Количество партий, шт.	Уровень бессбойной работы, ед./с	
		минимальный	средний
Схемы запоминающих устройств	5	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{11}$
Схемы вычислительных средств	6	$8,5 \cdot 10^7$	$5,1 \cdot 10^{11}$
Цифровые СБИС	9	$7,4 \cdot 10^9$	$4,4 \cdot 10^{11}$
Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)*	1	$1,3 \cdot 10^7$	–
Аналого-цифровой базовый матричный кристалл (АЦ БМК)*	1	$1,3 \cdot 10^8$	–

*Данные испытаний по одной партии, требуется набор статистики.

Таблица 2

Разбросы данных, полученных при испытаниях на стойкость к дозовому воздействию ИИ изделий, изготовленных в ходе БТП КМОП КНИ 250 нм

Table 2

Parameter spread obtained at radiation dose tolerance tests of products made on CMOS SOI 250 process

Вид ИС	Количество партий, шт.	Накопленная доза, ед.	
		минимальная	средняя
Схемы запоминающих устройств	21	$8,0 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^6$
Схемы вычислительных средств	5	$4,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^6$
Цифровые СБИС	15	$3,3 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$
АЦП*	1	$3,6 \cdot 10^4$	–
АЦ БМК*	1	$1,6 \cdot 10^6$	–

*Данные испытаний по одной партии, требуется набор статистики.

Таким образом, БТП КМОП КНИ 250 нм может обеспечить стойкость к импульсному воздействию ИИ изделий уровнями РС2 и РС3 [1]. Статистический контроль БТП относительно РС позволит перевести контроль производственных партий пластин в периодический режим для изделий категории стойкости РС2, но так как он отсутствует, то выпущенные в данном БТП партии пластин можно применять только после проведения испытаний. Дополнительно необходимо получить статистические данные для аналоговых и аналого-цифровых изделий.

В результате испытаний на стойкость изделий к дозовому воздействию ИИ обнаружена разная чувствительность изготовленных в данном БТП изделий к накопленной дозе ИИ. Наиболее чувствительными являются ИС запоминающих устройств и вычислительных средств. Предположительно разброс дозовой стойкости изделий связан с нестабильностью технологического процесса, в частности свойств исходных пластин структур кремний на изоляторе. Таким образом, общий минимальный уровень стойкости БТП КМОП КНИ 250 нм соответствует категории РС1.

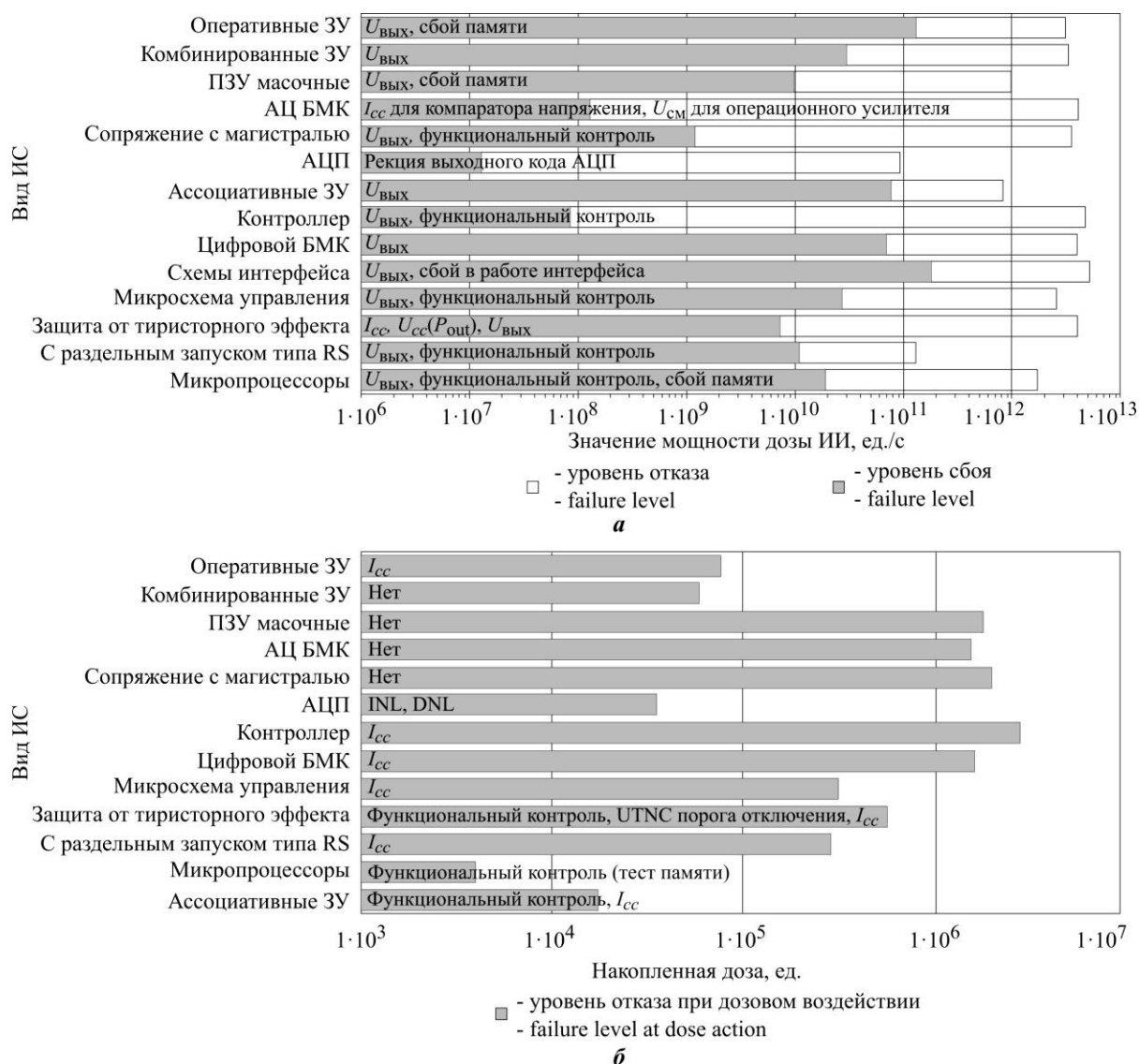


Рис. 1. Результаты испытаний на стойкость к импульсному (а) и дозовому (б) воздействиям ИИ по критичным видам отказов и по сбоям для разных функциональных классов изделий, изготовленных по БТП КМОП КНИ 250 нм ($U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение; I_{cc} – статический ток потребления; U_{cc} – напряжение питания схемы; U_{cm} – напряжение смещения)

Fig. 1. Testing facts of radiation tolerance (a – impulse action; b – dose action), by catastrophic failure types and by transient faults, for various functionality classes of products made on CMOS SOI 250 nm ($U_{\text{вых}}$ – output voltage; I_{cc} – static current consumption; U_{cc} – circuit supply voltage; U_{cm} – offset voltage)

БТП не является стабильным по РС – требуется проведение статистического контроля технологического процесса по РС и до стабилизации процесса необходим контроль каждой технологической партии пластин. Наличие радиационно-ориентированных моделей и ТС, разработанных в ходе РОХ, позволит оперативно выявить причины нестабильности БТП и провести необходимые коррекции на этапе подготовки к запуску изделий в производство.

На основе анализа полученных результатов испытаний можно выявить ТС, библиотечные элементы, сложнофункциональные блоки и типового представителя изделий или типовую оценочную схему (ТОС), являющиеся «слабым звеном», определяющим типовые уровни стойкости испытанной номенклатуры разрабатываемых по БТП изделий. Набор ТС (ПМ и СКТ) на примере процесса статистического регулирования тех-

нологического процесса КМОП КНИ 250 нм по РС, согласно результатам анализа инженерной практики и литературным данным [4–7], включает в себя следующие структуры.

Базовые элементы (рационально ввести в состав ПМ и/или СКТ):

– транзисторные структуры (транзисторные сборки), состоящие из всех типов транзисторов, используемых в логических элементах БИС. В качестве радиационно-чувствительных параметров можно рассматривать радиационно-индуцированные – токи утечки, сдвиг порогового напряжения, деградацию крутизны (подвижности) и подпорогового размаха передаточной характеристики, ионизационную реакцию от воздействия мощности дозы ИИ;

– набор резисторов. В качестве радиационно-чувствительных параметров можно рассматривать сопротивление (проводимость) n^+ - и p^+ -слоя, слаболегированных p - и n -слоев, легированного поликремниевого слоя;

– диоды различной ширины, диодные матрицы. В качестве радиационно-чувствительных параметров можно рассматривать радиационно-индуцированные токи утечки в p – n -переходе, ионизационную реакцию от воздействия мощности дозы ИИ;

– тестовые конденсаторы: слои кремния n - и p -типов на скрытом окисле, такой же слой с нанесенным поликремнием, аналогичные структуры со слоями кремния в виде «гребенки» и вложенных «гребенок». В качестве радиационно-чувствительных параметров можно рассматривать изменение вольт-фарадных (CV) характеристик;

– паразитные структуры, позволяющие локализовать токи утечки.

Функциональные блоки и фрагменты схем (топологий), наиболее чувствительные к воздействию ИИ (рационально ввести в состав СКТ):

– структуры для исследования динамических параметров, например кольцевой генератор или линии задержки. В качестве радиационно-чувствительного параметра можно рассматривать изменение тока потребления, изменение частоты генерации, время задержки распространения сигнала;

– структуры ESD-защиты, схемы ввода-вывода (из состава ячеек ввода-вывода, I/O). В качестве радиационно-чувствительных параметров можно рассматривать ионизационную реакцию от воздействия мощности дозы ИИ, выполнение операции приемо-передачи сигнала по установленному алгоритму, ток утечки в состоянии «выключено»;

– ячейки (матрицы) памяти различных конфигураций, планируемых к применению в изделии: хранение информации в ячейке памяти, изменение тока потребления, выполнение операции записи, хранения и считывания информации, время выборки;

– типовые сложнофункциональные блоки (IP-блоки) – аналоговые, аналого-цифровые и цифровые;

– чувствительные элементы преобразователей физических величин. При их использовании в составе изделий – точностные параметры характеристики преобразования.

Большая часть указанных структур является стандартными ПМ для статистического контроля воспроизводимости технологического процесса. Однако с точки зрения технологичности проведения облучения и измерений работа с тестовой полосой ПМ без разварки кристалла в корпус или тару-спутник затруднена.

Как правило, радиационные исследования базовых тестовых элементов (транзисторов, резистивных элементов, конденсаторов) проводятся в процессе РОХ, а полученные результаты являются входными данными для радиационно-ориентированных моделей и проектирования. В общем случае экспериментальный контроль ПМ в процессе производства с использованием облучения проводить нецелесообразно – можно ограничиться общепринятым статистическим контролем электрических параметров без облучения с учетом разбросов внутри партии и от партии к партии. Однако в случае если

полученные в ходе РОХ зависимости параметров ПМ от воздействия ИИ являются критичными для данного БТП, то базовые элементы следует включить в состав СКТ, которая топологически представляет собой отдельный тестовый кристалл с возможностью разварки в корпус или тару-спутник. Такой тестовый кристалл может располагаться как на отдельных областях пластины, так и на отдельных пластинах.

Выбор объекта статистического контроля производственных партий пластин по радиационной стойкости. План контроля изделия в процессе производства разрабатывается на основе данных, полученных в результате РОХ БТП и предварительных испытаний изделия на этапе его разработки и освоения производства. Проводится выбор номенклатуры, определяются параметры-критерии годности, а также опорные (эталонные) радиационные отклики и уровни отказов всех или выборочных (типовых и критичных) библиотечных элементов и функциональных блоков из состава СКТ. Таким образом, СКТ, предназначенные для контроля БТП по РС, должны обеспечивать оценку устойчивости всех библиотечных элементов, реализованных в рамках БТП, к заданному минимальному уровню испытательного воздействия ИИ [8], а также оценку выхода годных изделий и распределения брака по видам и причинам в технологическом процессе.

В ходе разработки нового изделия необходимо выбрать его имитатор для прогнозного контроля производственных партий пластин в процессе серийного производства. Если в результате анализа установлено, что СКТ, разработанная в результате РОХ, является репрезентативной для оценки РС нового изделия, то целесообразно применять ее в качестве типовой оценочной схемы (ТОС) для контроля производственных партий пластин. Однако если в составе нового изделия задействованы лишь выборочные библиотечные элементы, то в качестве ТОС следует применять только задействованную часть СКТ. Уровень РС готового изделия, полученный по результатам испытаний ТОС, может быть значительно выше, чем нормативный (гарантированный) уровень, обеспечиваемый БТП и определяемый по СКТ в целом, в случае отсутствия в изделии наиболее радиационно критичных библиотечных элементов, например источников опорного напряжения, прецизионных аналоговых или аналого-цифровых элементов [3, 9].

Наилучшее сочетание информативности и технико-экономической эффективности радиационного контроля в производстве обеспечивается при полноценных радиационных испытаниях СКТ для оценки стабильности БТП и использовании в качестве ТОС для контроля партий пластин лишь той части СКТ, которая относится к задействованным библиотечным элементам. Таким образом, данные радиационного поведения ТОС являются лишь «урезанной выжимкой» из ранее полученных полных данных испытаний СКТ. Если выявляются критичные особенности радиационного поведения нового изделия, не учитываемые СКТ (например, за счет взаимного влияния библиотечных элементов), то в качестве ТОС для контроля производственных партий пластин используется либо доработанная СКТ, учитывающая отмеченные особенности, либо само изделие. Если испытания СКТ и ТОС показали отсутствие запаса по уровню стойкости изделия, указанного в технических условиях, то для обеспечения гарантий потребителям также целесообразно проводить испытания производственных партий пластин на самих изделиях [3]. Общие требования к составу ТОС задаются в технологической документации, однако они не учитывают особенностей контроля производственных партий пластин по РС в процессе производства.

Статистический контроль ПМ и СКТ следует проводить на кристаллах в рамках выборочного и функционального контроля с учетом данных о характерных типах отказов и о чувствительности параметров тестовых структур, полученных в процессе РОХ БТП. На рис. 2 показаны примеры структурных схем стендов, которые применяют для радиационного контроля кристаллов на пластинах [10].

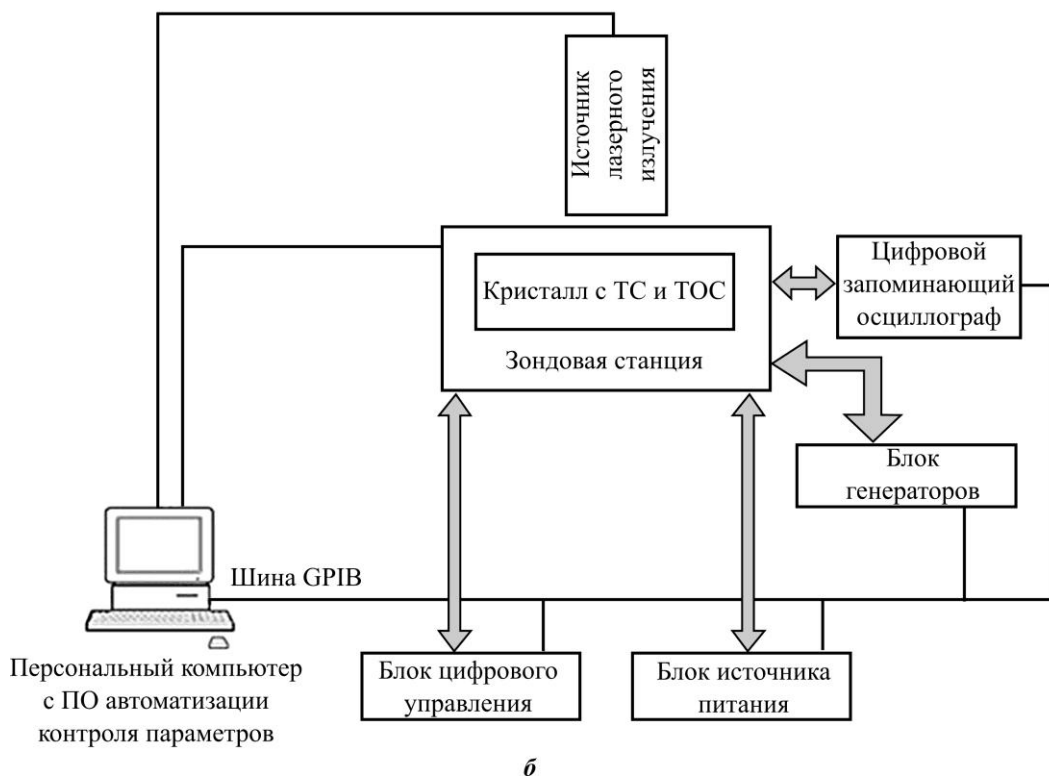
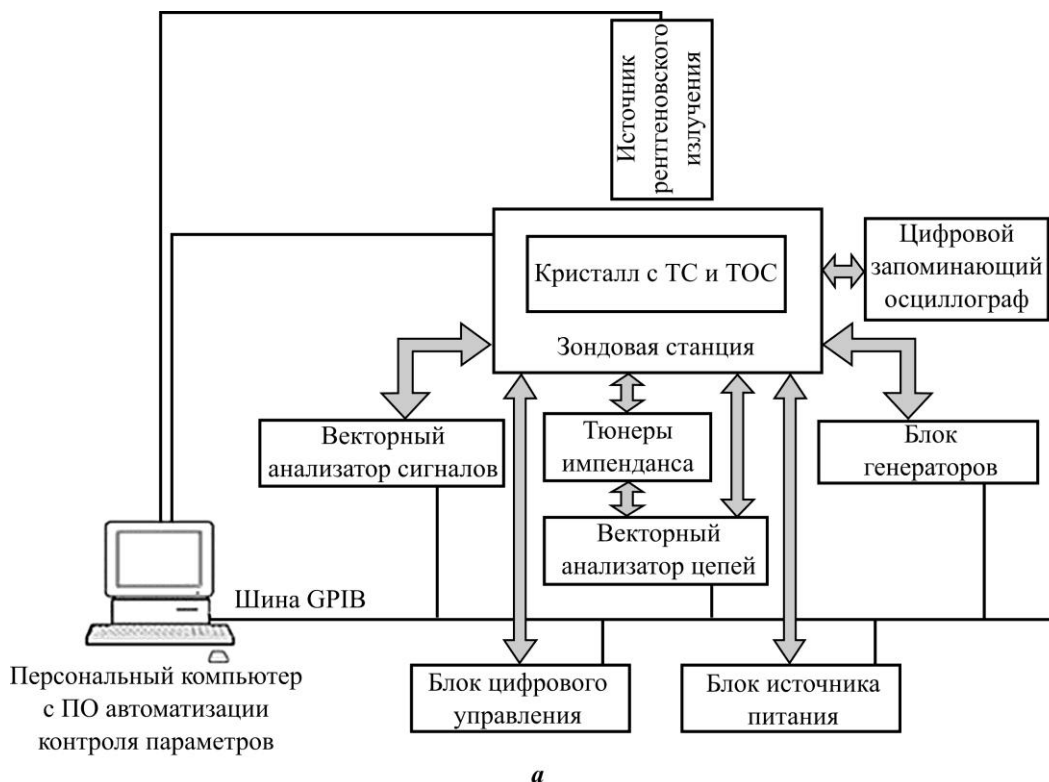


Рис. 2. Структурная схема стенда для оперативного автоматизированного контроля параметров зондовыми методами при дозовом радиационном воздействии (а) и при импульсных видах радиационного воздействия (б)

Fig. 2. Structure chart of operating automatic test stand for probe testing under dose radioactive action (a) and impulse types of radioactive action (b)

Результаты, полученные в ходе статистического контроля БТП и испытаний производственных партий пластин, обрабатываются с помощью статистических методов с учетом малых выборок и погрешностей дозиметрии и измерений при получении данных по РС.

Оценка результатов мониторинга производственных партий пластин. Статистическая обработка данных. Статистическая обработка данных при проведении мониторинга БТП, гарантирующего РС, имеет свои особенности. На этапе мониторинга БТП отслеживается однородность от партии к партии и от пластины к пластине с учетом того, что границы регулирования для БТП, гарантирующие РС, должны быть заданы с учетом того, что изменение параметров и режимов БТП на 10 % может привести к изменению уровней РС более чем на 100 %. [11]. На этапе статистического контроля БТП, гарантирующего РС, проводят мероприятия по обработке статистического регулирования БТП РС [3]:

- определяют значения основных статистических параметров, коэффициентов, показателей, характеризующих способность БТП гарантировать необходимый уровень РС;
- проводят анализ полученных зависимостей параметров тестовых структур от уровня воздействия ИИ с целью прогнозной оценки стойкости готового изделия;
- проводят мониторинг нескольких производственных партий для установления разбросов параметров, после чего выпускают научно-техническую документацию для проведения статистического контроля по РС.

На этапе контроля РС конкретных чипов-полуфабрикатов ТОС и/или готовой продукции статистический контроль направлен на проверку степени отклонения текущей партии от базовой группы, которая была выбрана в качестве эталонной, например от выборки, испытанной в ОКР [3]. Объем контроля, заложенный в научно-технической документации (по 3 шт. на каждую подгруппу испытаний по группе Е – испытаний на стойкость к воздействию мощности дозы и накопленной дозы ИИ), не позволяет с достаточной степенью точности пользоваться статистическими методами для анализа нормально распределенных данных.

Оценить однородность производственных партий можно с помощью непараметрических статистических критериев оценивания, которые свободны от предположений о виде рассматриваемого статистического распределения, априори неизвестного. Со статистической точки зрения проверяется гипотеза о равенстве двух распределений вероятности. Альтернативные гипотезы строятся для оценок параметров сдвига и масштаба [6, 8, 12, 13]. В качестве подходящих можно рассматривать различные непараметрические статистические критерии, в том числе критерий Лемана – Розенблатта, критерий Манна – Уитни, а также критерий Вилкоксона, включая обобщенный критерий Вилкоксона – Сиджела – Тьюки [8, 12, 13]. Предлагается для малых объемов выборок образцов определять точные количественные статистические критерии их принадлежности к базовой группе путем явного перечисления всех возможных перестановок, возникающих при сравнении двух рассматриваемых статистических совокупностей [13, 14]. Использование компьютерных технологий обеспечивает более высокую точность и оперативность результатов по сравнению со статистическими таблицами.

Расчет коэффициента переоблучения для контроля производственных партий пластин. В плане контроля стойкости производственных партий пластин заложен объем выборки, равный 3 шт., поэтому для гарантирования заданного уровня стойкости на малой выборке применяют способ увеличения радиационной нагрузки с коэффициентом K_n [15], под которым понимается отношение повышенного уровня воздействия ИИ X_n к уровню воздействия X_t , заданному в научно-технической документации:

$$K_n = \frac{X_n}{X_T}$$

Коэффициент увеличения радиационной нагрузки K_n определяется следующей формулой:

$$K_n = \frac{M - z_p \sigma}{M - z_R \sigma} = \frac{1 - z_p V}{1 - z_R V}, \quad (1)$$

где z_R и z_P – квантили нормального распределения, отвечающие уровням вероятности R и P соответственно; M и σ – предполагаемые среднее значение и стандартное отклонение нормальной генеральной совокупности; $V = \sigma/M$ – коэффициент вариации. Параметр R – вероятность сохранения работоспособности изделия [11, 12], параметр P – нижняя граница доверительного интервала, определяемая из соотношения

$$P = (1 - \gamma)^{1/n},$$

где γ – доверительная вероятность; n – объем выборки.

Рассматриваемый статистический контроль отвечает следующим значениям параметров: $R = 0,95$; $\gamma = 0,9$; $V = 0,25$. Метод расчета проиллюстрирован на рис. 3.

Таким образом, для заданной выборки (3 шт.) согласно формуле (1) получаем $K_n = 1,74$, что требует существенного переоблучения каждого образца с положительным результатом контроля работоспособности для подтверждения заданных требований дозовой стойкости. Этот подход предполагает, что производственный процесс имеет более высокую стабильность по отношению к уровню нормативной дозовой стойкости изделия.

Если учесть тот факт, что изделие производится в едином конструктивно-технологическом базисе, то каждая новая выборка является частью ранее выпущенных и испытанных образцов. Тогда каждая следующая партия увеличивает общий размер базовой выборки, что позволяет снизить K_n вплоть до уровня, близкого к коэффициенту $K_n = 1$ при размере базовой выборки более 40. Принадлежность к общей базовой выборке проверяется с помощью методов непараметрического статистического оценивания. Следует отметить, что в данном случае в зачет идут лишь те партии, которые удовлетворяют требованиям по РС, установленным для изделия. Таким образом, нижняя граница оказывается строго заданной и рассматривается только разброс выше этой границы.

Если по данным непараметрического статистического оценивания при контроле партий пластин установлено, что рассматриваемая очередная выборка не принадлежит базовой совокупности ранее изготовленных и испытанных изделий, то в технологическом процессе имеют место изменения (декларированные или недеklarированные) и текущий технологический процесс отличается от ранее охарактеризованного. Таким

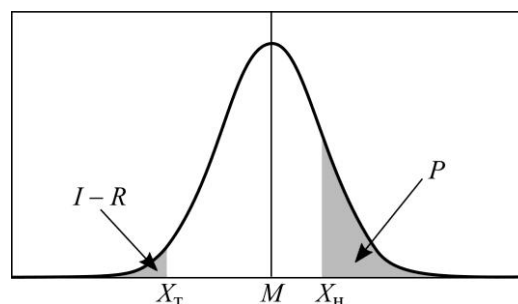


Рис. 3. Иллюстрация метода расчета коэффициента увеличения радиационной нагрузки K_n (площадь «хвоста» правее уровня X_n равна P , площадь хвоста левее уровня X_T равна $1 - R$)
 Fig. 3. Illustration of the method for calculating the radiation load increase factor K_n (the tail area to the right of X_n level is equal to P , the tail area to the left of X_T level is equal to $1 - R$)

образом, для гарантирования стойкости необходим положительный результат испытаний при использовании высокого коэффициента переоблучения (например, $K_n = 1,74$ для выборки объемом 3 шт.). Если испытанные выборки образцов из нескольких последовательно изготовленных производственных партий по результатам непараметрического статистического оценивания принадлежат не старой базовой выборке, а новой общей базовой выборке (например, имеют более высокий, чем раньше, уровень стойкости), то на основании полученных с использованием непараметрических статистических критериев данных следует провести корректирующие действия по характеристике измененного технологического процесса (например, переаттестацию технологического процесса, изменение норм на параметры изделия, определяющие РС и т. д.) [14].

Заключение. Рациональный методический подход к контролю радиационной стойкости партий пластин в процессе производства позволяет гарантировать выполнение требований, предъявленных к изделию на основе контроля стабильности БТП по ПМ и СКТ, выбранным в процессе РОХ, и контроля стабильности уровня РС готовой продукции.

Мониторинг стабильности БТП по РС дает возможность рационально минимизировать объем испытаний готовой продукции, а иногда и отказаться от испытаний (правильный выбор ТОС на основе информации ОКР и РОХ БТП). Стабильность технологического процесса обуславливает переход контроля партий пластин от сплошной к периодической основе. Мониторинг стабильности характеристик производственных партий пластин на основе испытаний по группе Е позволяет уверенно гарантировать РС для категорий РС2 на сплошной и периодической основах, РС3 [1] на сплошной основе и при 100%-ном контроле. Рационально выбранная ТОС позволяет унифицировать испытания и сэкономить на оснастке и разработке методик испытаний.

Литература

1. *Московская Ю. М., Бойченко Д. В.* Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве. I. Система и алгоритмы реализации для различных категорий изделий // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 189–201. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-189-201>
2. Все о качестве. Отечественные разработки: науч.-техн. сб. / под ред. Г. Е. Герасимовой. Вып. 6: Статистическое управление технологическим процессом (методическое пособие). М.: НТК «Трек», 2001. 60 с.
3. *Московская Ю. М.* Сравнительный анализ подходов к контролю радиационной стойкости ЭКБ в ходе ОКР и серийного производства // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № S7 (107). С. 293–296. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.293.296>
4. Optimizing and controlling the radiation hardness of a Si-gate CMOS process / *P. S. Winokur, E. B. Errett, D. M. Fleetwood et al.* // IEEE Transactions of Nuclear Science. 1985. Vol. 32. No. 6. P. 3954–3960. <https://doi.org/10.1109/TNS.1985.4334049>
5. *Сивченко А. С.* Разработка методики анализа дефектности подзатворного диэлектрика на тестовых структурах в составе пластин // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2014. № 2. С. 145–150.
6. *Московская Ю. М., Никифоров А. Ю., Сницар В. Г.* Рациональный методический подход к контролю радиационной стойкости партий пластин в процессе производства // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 188–190. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.188.190>
7. *Горбунов М. С.* Моделирование и проектирование элементов КМОП интегральных микросхем технологии «кремний-на-изоляторе» с повышенной стойкостью к дозовым эффектам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 25 с.
8. *Lehmann E. L., D'Abbrera H. J.* Nonparametrics: Statistical methods based on ranks. San Francisco: Holden-Day, 1975. 457 p. (Holden-Day series in probability and statistics).

9. Состав и принцип формирования типовой оценочной схемы для оценки радиационной стойкости базовых матричных кристаллов и полупроводниковых БИС на их основе / **Ю. М. Московская, Р. А. Федоров, А. Н. Денисов и др.** // Наноиндустрия. 2017. № 1 (71). С. 60–69. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2017.71.1.60.69>

10. **Елесин В. В., Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чуков Г. В.** Комплекс методических, аппаратных и программных средств для автоматизированных исследований параметров полупроводниковых СВЧ ИС в условиях испытаний на радиационную стойкость // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 28–32.

11. Process parameters variations influence on CMOS IC's hardness to total ionizing dose / **Y. M. Moskovskaya, A. Y. Nikiforov, D. V. Bobrovskiy et al.** // 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL). Niš: IEEE, 2017. P. 275–277. <https://doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190120>

12. **Большев Л. Н., Смирнов Н. В.** Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.

13. Nonparametric statistical analysis of radiation hardness threshold variation in CMOS IC wafer lots series with the aim of process monitoring / **Yu. I. Bogdanov, N. A. Bogdanova, D. V. Fastovets et al.** // 2019 IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL). Niš: IEEE, 2019. P. 193–196. <https://doi.org/10.1109/MIEL.2019.8889642>

14. Статистический контроль радиационной стойкости в ходе серийного производства микросхем на основе непараметрических критериев оценивания / **Ю. М. Московская, Ю. И. Богданов, А. В. Сокоян и др.** // Международный форум «Микроэлектроника-2019», 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» (Республика Крым, г. Алушта, 30 сент. – 05 окт. 2019): сб. тезисов. М.: Техносфера, 2019. С. 163–167.

15. **Крамер Г.** Математические методы статистики / пер. с. англ. А. С. Мониной, А. А. Петрова; под ред. А. Н. Колмогорова. 2-е изд., стер. М.: Мир, 1975. 648 с.

Статья поступила в редакцию 10.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 24.11.2022 г.; принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Московская Юлия Марковна – старший научный сотрудник кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31), руководитель Обособленного подразделения «Зеленоград» АО «ЭНПО СПЭЛС» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер лаборатории испытаний НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ummos@spels.ru

Бойченко Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31), генеральный директор АО «ЭНПО СПЭЛС» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, стр. 44), dvboy@spels.ru

References

1. Moskovskaya Yu. M., Boychenko D. V. Prediction analysis of the microcircuits' radiation hardness within fabrication process. I. System and its implementation algorithms for various product categories. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 189–201. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-189-201>

2. *All about quality. Domestic developments*, ed. G. E. Gerasimova. Iss. 6. *Statistical process control (guidance manual)*. Moscow, NTK “Trek” Publ., 2001. 60 p. (In Russian).

3. Moskovskaya Yu. M. Comparative analysis of approaches to control the radiation resistance of the ECB during the OCP and serial production. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2021, vol. 14, no. S7 (107), pp. 293–296. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.293.296>

4. Winokur P. S., Errett E. B., Fleetwood D. M., Dressendorfer P. V., Turpin D. C. Optimizing and controlling the radiation hardness of a Si-gate CMOS process. *IEEE Transactions of Nuclear Science*, 1985, vol. 32, no. 6, pp. 3954–3960. <https://doi.org/10.1109/TNS.1985.4334049>

5. Sivchenko A. S. Development of methods for the analysis of defects in the gate dielectric on the test structures in the wafers. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2014, no. 2, pp. 145–150. (In Russian).

6. Moskovskaya Yu. M., Nikiforov A. Yu., Snitsar V. G. Rational methodological approach to control of plates batches radiation resistance during production. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2020, vol. 13, no. S4 (99), pp. 188–190. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.188.190>
7. Gorbunov M. S. *Modeling and design of “silicon-on-insulator” technology CMOS integrated circuit elements with increased resistance to dosage effects*, extended abstract of diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Moscow, 2010. 25 p. (In Russian).
8. Lehmann E. L., D’Abrera H. J. *Nonparametrics: Statistical methods based on ranks*. San Francisco, CA, Holden-Day, 1975. 457 p. Holden-Day series in probability and statistics.
9. Moskovskaya Yu., Fedorov R., Denisov A., Bobrovskiy D., Ulanova A., Nikiforov A. Composition and principle of formation of standard evaluation circuit as simulator of gate arrays and semicustom very large scale IC based on them for radiation tests. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2017, no. 1 (71), pp. 60–69. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2017.71.1.60.69>
10. Elesin V. V., Nikiforov A. Yu., Telets V. A., Chukov G. V. A set of methodological, hardware and software tools for automated research of the parameters of semiconductor microwave ICs under conditions of radiation resistance tests. *Spetstekhnika i svyaz’*, 2011, no. 4-5, pp. 28–32. (In Russian).
11. Moskovskaya Y. M., Nikiforov A. Y., Bobrovskiy D. V., Ulanova A. V., Zhukov A. A. Process parameters variations influence on CMOS IC’s hardness to total ionizing dose. *2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL)*. Niš, IEEE, 2017, pp. 275–277. <https://doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190120>
12. Bol’shev L. N., Smirnov N. V. *Tables of mathematical statistics*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 416 p. (In Russian).
13. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Fastovets D. V., Moskovskaya Yu. M., Sogojan A. V., Nikiforov A. Yu. Nonparametric statistical analysis of radiation hardness threshold variation in CMOS IC wafer lots series with the aim of process monitoring. *2019 IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL)*. Niš, IEEE, 2019, pp. 193–196. <https://doi.org/10.1109/MIEL.2019.8889642>
14. Moskovskaya Yu. M., Bogdanov Yu. I., Sogojan A. V., Nikiforov A. Yu., Bogdanova N. A., Fastovets D. V. Statistical monitoring of radiation stability during serial production of chips based on nonparametric evaluation criteria. *Mezhdunarodnyy forum “Mikroelektronika-2019”, 5-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya “Elektronnaya komponentnaya baza i mikroelektronnyye moduli” (Respublika Krym, g. Alushta, 30 sent. – 05 okt. 2019)*, collection of abstracts. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2019, pp. 163–167. (In Russian).
15. Cramér H. *Mathematical methods of statistics*. 13th print. Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, 1974. 575 p. Princeton landmarks in mathematics.

The article was submitted 10.11.2022; approved after reviewing 24.11.2022;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Julia M. Moskovskaya – Senior Researcher of the Electronics Department, National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute) (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe ave., 31), Head of the Separate division “Zelenograd”, “ENPO SPELS” JSC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the Testing Laboratory, SMC “Technological Center” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ymmos@spels.ru

Dmitry V. Boychenko – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute) (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe ave., 31), General Director, “ENPO SPELS” JSC (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe ave., 31, bld. 44), dvboy@spels.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Original article

УДК 621.3.049.77:621.382.3

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-3-351-359

EDN: UDMQWS

A method for minimizing aging influence on rail-to-rail operational amplifier with thin oxide transistors

V. Sh. Melikyan, S. A. Ghukasyan, S. S. Harutyunyan,
G. A. Voskanyan, N. A. Asatryan

National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia
“Synopsys Armenia” CJSC, Yerevan, Armenia

ghukasya@synopsys.com

Abstract. In technological processes below 5 nm the semiconductor manufacturing companies face difficulties during fabrication of transistors with thick gate oxide. As supply voltages are not scaled respectively, it causes stress between transistor terminals, which leads to transistor aging degradation. In this work, a method is proposed for designing rail-to-rail operational amplifier with usage of only thin oxide transistors. Amplifier scheme was designed with “SAED 14nm” FinFET technology. As a result of using the proposed method the aging degradation has been reduced by protecting transistors from stress conditions. Based on the proposed design I_{ds} variation is reduced from 22.4 to 3.9 % and threshold voltage V_{th} variation from 252 to 28 mV.

Keywords: CMOS, aging, stress, rail-to-rail, thin oxide transistor

Funding: the work has been supported by the Science Committee of the Republic of Armenia (project No. 21T-2B002).

For citation: 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. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 351–359. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-351-359>. – EDN: UDMQWS.

Метод минимизации влияния старения на rail-to-rail операционный усилитель с тонкими оксидными транзисторами

В. Ш. Меликян, С. А. Гукасян, С. С. Арутюнян,
Г. А. Восканян, Н. А. Асатрян

Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван,
Армения

ЗАО «Синописис Армения», г. Ереван, Армения

ghukasya@synopsys.com

Аннотация. В технологических процессах менее 5 нм компании-производители полупроводников сталкиваются с трудностями при изготовлении транзисторов с толстым оксидом подзатвора. Поскольку напряжения питания не масштабируются соответствующим образом, это вызывает стресс между клеммами транзистора, что приводит к старению транзистора. В работе предложен метод проектирования rail-to-rail операционного усилителя с использованием только тонких оксидных транзисторов. Схема усилителя разработана с использованием 14 нм FinFET технологии SAED. В результате применения метода деградация из-за старения снижена за счет защиты транзисторов от стрессовых условий. На основе предложенной конструкции уменьшены разброс тока I_{ds} с 22,4 до 3,9 % и разброс порогового напряжения V_{th} с 252 до 28 мВ.

Ключевые слова: КМОП, старение, стресс, rail-to-rail, тонкий оксидный транзистор

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке Республики Армения (проект № 21Т-2В002).

Для цитирования: Метод минимизации влияния старения на rail-to-rail операционный усилитель с тонкими оксидными транзисторами / В. Ш. Меликян, С. А. Гукасян, С. С. Арутюнян и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 351–359. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-351-359>. – EDN: UDMQWS.

Introduction. As the transistor's sizes grow smaller during technological progress, many undesirable phenomena have arisen, damaging the reliability of integrated circuits (ICs), thus additional accuracy during design process is needed [1]. One of phenomena leading to the shortening of the blocks life span is aging [2].

Three major aging effects are:

– Hot Carrier Injection (HCI), when particles with kinetic energy under high electric field are injected into gate oxide region and trapped, which leads to a shift in threshold voltage V_{th} (fig. 1) [3];

– Bias Temperature Instability (BTI), when V_{th} and I_{ds} shift after a negative bias for PMOS (NBTI) and positive bias for NMOS (PBTI) is applied at elevated temperatures; some portion of degradation recovers after the stress is removed (fig. 2) [4];

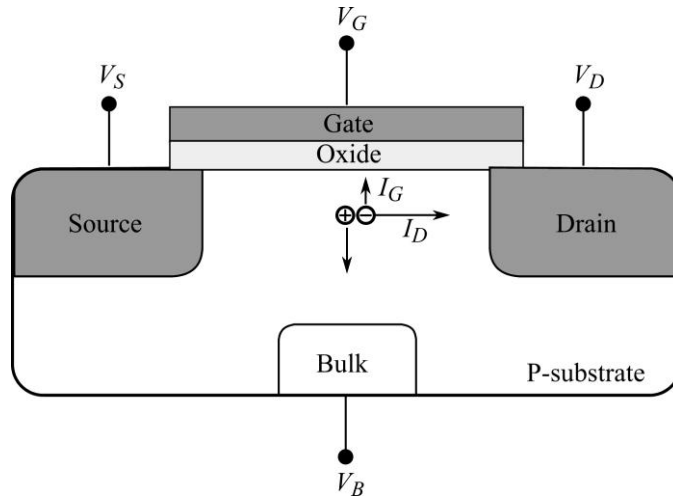


Fig. 1. Illustration of HCI effect

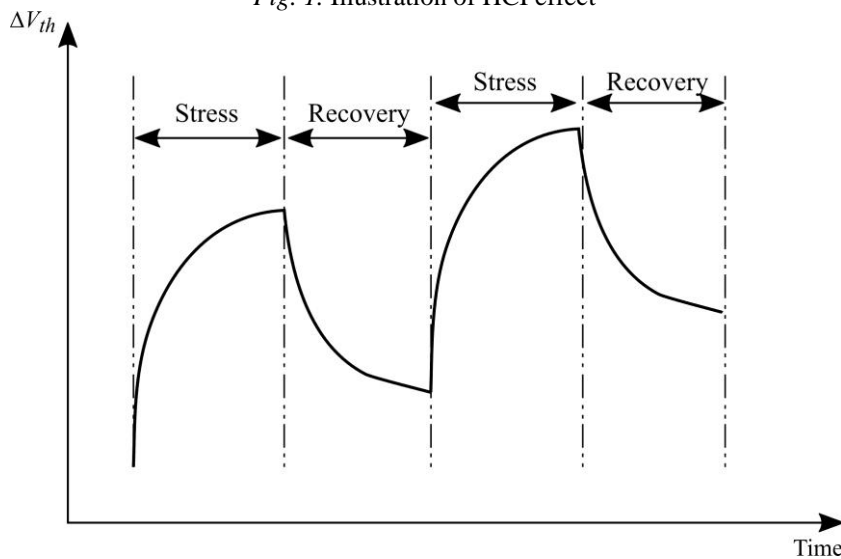


Fig. 2. Stress and recovery phases during circuit's lifetime

– Time-Dependent Dielectric Breakdown (TDDB), a process unfolding gradually: at first, soft breakdown (BD) occurs, then, during dielectric wearout, gate leakage increases and signal swing and cell timing are reduced, and finally, hard BD takes place, when trap induced conduction channel is formed and widened, which leads to exponential increase of leakage (fig. 3) [5].

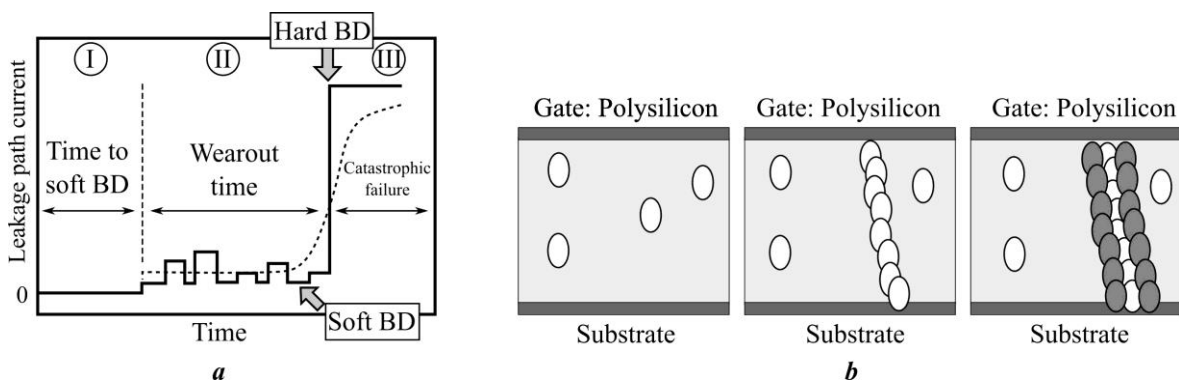


Fig. 3. Illustration of TDDB effect: a – process stages; b – trap induced conduction channel formation

The power supply units of PCs and other devices incorporate multiple DC power supplies. A power supply line provided by a power supply unit is referred to as a power rail. The entire range from the maximum voltage of a power line (VDDH) to its minimum voltage (GND) is referred to as rail-to-rail. Operational amplifiers having a common-mode input voltage range that almost covers the GND-to-VDDH range at input and output are called rail-to-rail operational amplifiers (or full-swing). Rail-to-rail operational amplifiers make it possible to operate at lower supply voltages, swing closer to the rails, and provide wider dynamic range [6]. Below are presented the schematic view (fig. 4) and HSPICE simulation results (fig. 5, 6) of the rail-to-rail operational amplifier designed by “SAED 14nm” FinFET technology [7, 8] using “Custom compiler” tool [9].

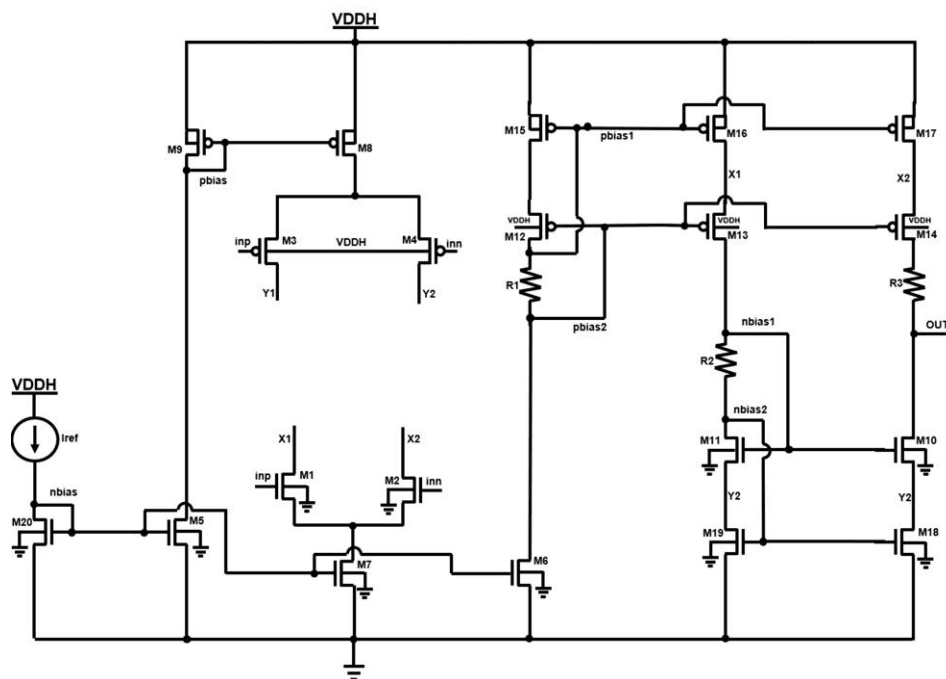


Fig. 4. Schematic view of rail-to-rail operational amplifier

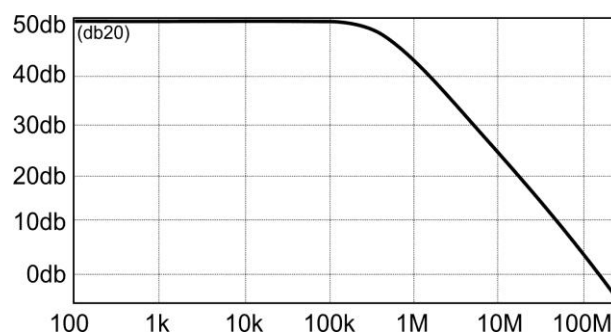


Fig. 5. AC characteristic of designed rail-to-rail operational amplifier

Such structures are in routine use in the input receiver inside auxiliary ports (AUX). AUX is a type of standard communications port on a device that accommodates audio signals for: MP3 players, headphones and headsets, microphones, speakers, and other audio devices. They are also used inside digital delay lines (DDL) in charge pumps and in voltage and/or temperature drift compensation circuits.

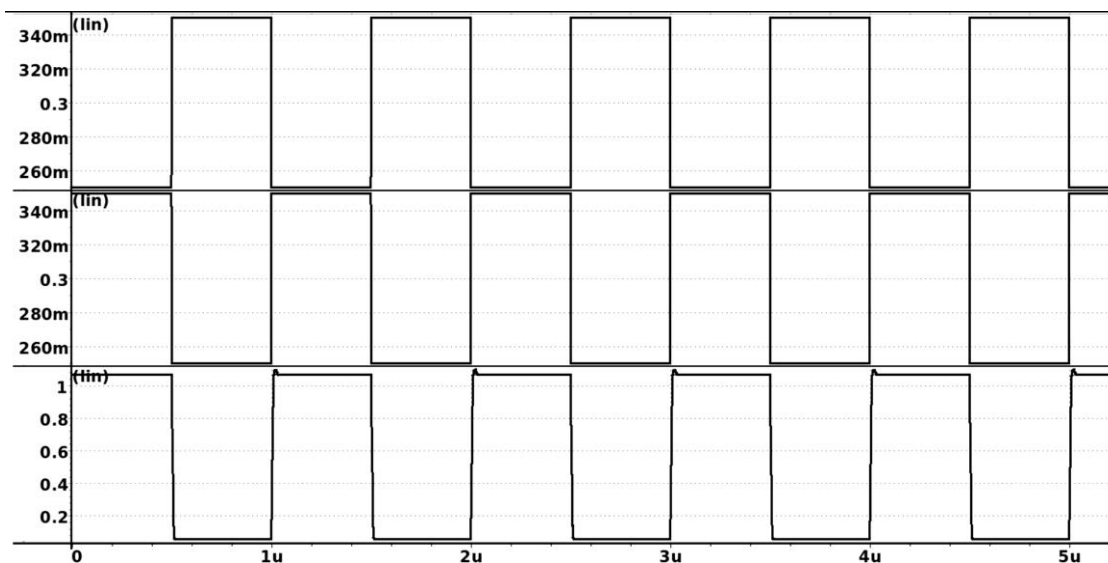


Fig. 6. Transient simulation results of designed rail-to-rail operational amplifier

Problem description. Nowadays semiconductor manufacturing companies are facing difficulties when fabricating transistors with thick gate oxide in some technological processes below 5 nm, hence the necessity to replace all thick oxide devices with thin oxide devices, thereby causing difficulties at the design stages [10]. So far operational amplifiers are designed with thick oxide devices, and their replacement with thin oxide can cause stress, because of high supply voltages. Stress conditions between two terminals of thin oxide transistor are lower than for thick oxide transistor. All thin oxide transistors are designed and fabricated to have maximum voltage difference between terminals (gate-drain V_{GD} , gate-source V_{GS} , drain-source V_{DS}) equal to low supply voltage, and using them in high supply voltage analog blocks can cause stress on those devices [11], which will lead to enhanced aging degradation. One of the ways to solve this problem is to make the devices work under non-stress conditions [12].

Generally, to explore the deterioration of the rail-to-rail operational amplifier parameters due to aging degradation, aging simulation is used. This simulation captures the effect of degradation of transistors over time. Semiconductor manufacturing companies are providing their own aging models accurately describing the degradation of devices during lifetime.

For exploration of aging degradation of the designed rail-to-rail operational amplifier the SPICE simulations for 10 years have been performed for two operating modes: normal operation and power down. In *normal operation* mode some aging degradation was detected on the main devices, but without dramatic change of main parameters. To enter circuit to the power down mode the following modifications have been performed (fig. 7): added P1, P2, P3, P4, P5 and P6 transistors (indicated by dashed line). The P1, P2, P3, P4, P5 and P6 transistors cut all the paths for the current flow. In *power down* mode aging degradations were observed for more main devices and all power down devices, which leads to the reduction of DC gain approximately by 12 dB. Simulation results for devices that demonstrated significant V_{th} and I_{ds} shifts in normal operation and power down modes after 10 years aging are presented in table 1. In normal operation mode the degradation of M1 and M2 input devices is due their drains reaching to VDDH, and gates near 300 mV, which causes stress. The drain of M10 that is the output of the amplifier can reach to VDDH and gate can be closed to 200 mV, which leads to stress. In power down mode M5 and M6 devices are under the same conditions

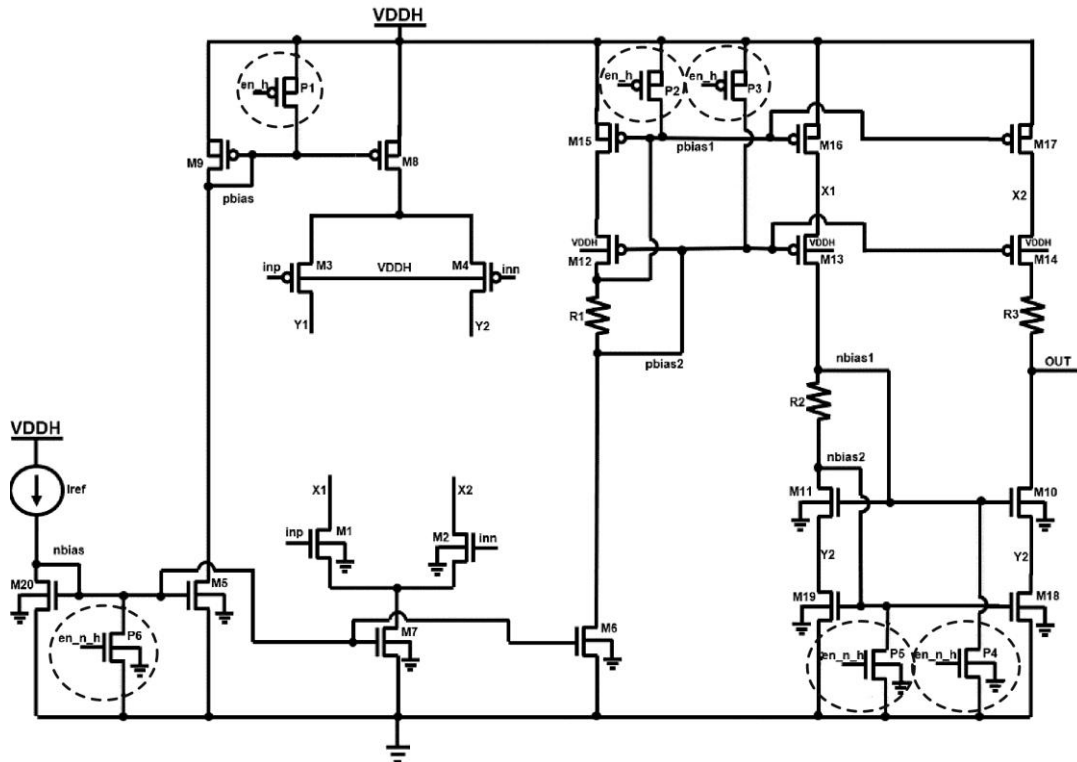


Fig. 7. Schematic view of rail-to-rail operational amplifier after adding power down devices (---)

Table 1

V_{th} and I_{ds} variation for most degraded devices for rail-to-rail operational amplifier

Transistor name	Normal operation mode		Power down mode	
	ΔV_{th} , mV	ΔI_{ds} , %	ΔV_{th} , mV	ΔI_{ds} , %
M1, M2	119	15.2	26	4.1
M5, M6	25	3.8	178	18.5
M10	109	14.6	0.1	0.1
M13, M14	31	4.5	182	19.3
P1, P2, P3	0.1	0.1	252	22.4
P4, P5, P6	0.1	0.1	252	22.4

and are operating in off mode because P6 drives gates of M5 and M6 to 0, and P1 drives M5 drain and P3 drives M6 drain to VDDH, so V_{GD} for both is VDDH. M13 device is in off mode, P3 drives M13 gate to VDDH, P4 drives M13 source to 0, drain is floating and can reach to VDDH. Same for M14. The P1, P2 and P3 power down devices should be open, and their control signal is 0, so V_{GS} and V_{GD} is VDDH. The gates of P4, P5 and P6 devices are connected to VDDH level signal, thus V_{GS} and V_{GD} is VDDH.

Obtained results demonstrated the problems' manifestation in both normal and power down modes.

Proposed solution. To solve the stress-induced problems that have arisen, the following changes (indicated by dash-dot line) have been implemented in the amplifier (fig. 8.):

- the power down enable signal separated for NMOS and PMOS devices; additionally, their logic 0 and logic 1 domains changed using multi output level converter (from 0 to v_{nbias} for NMOS and from v_{pbias} to VDDH for PMOS) [12];

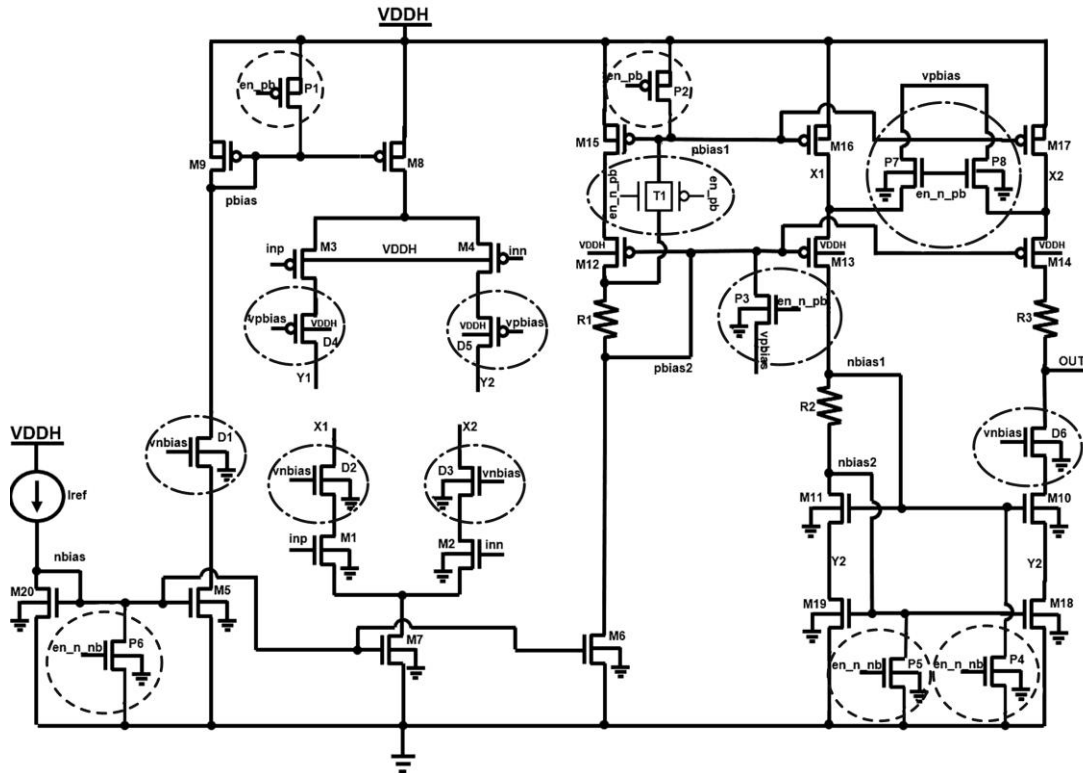


Fig. 8. Schematic view of rail-to-rail operational amplifier after modifications (---)

- cascading method used by adding D1, D2, D3, D4, D5 and D6 devices [11];
- T1 transmission gate added to cut the pbias1 and pbias2 nets when amplifier is in power down mode;
- P3 PMOS device replaced with NMOS device and source changed from VDDH to vpbias;
- P7 and P8 devices added to drive x1 and x2 nets to vpbias in power down mode.

Generally, cascode transistors gate receives bias voltage that limits source voltage of NMOS below bias voltage and source voltage of PMOS above bias voltage, otherwise transistors will be closed. Correctly chosen bias voltage value for cascode devices will bring desirable effect: no stress in the circuit. The vnbias and vpbias values could be generated using voltage dividers or bandgap reference, with proper matching techniques in layout the voltage should not vary by more than 5%. The *_nb and *_pb signals are also for protecting devices from stress, they can be applied from multi output level converters. For *_pb signal low level is vpbias and high level is VDDH, and for *_nb signal it is 0 and vnbias, respectively. With these methods the devices will be under working conditions defined by factories (no stress) and will have much longer lifetime.

The D1 transistor will prevent M5 device from stress, D2 and D3 will protect M1 and M2 correspondingly. D4 and D5 will protect M3 and M4, when input common mode is high, although in simulation under study there was no such scenario. D6 will protect M10. P3 device will drive gates of M13 and M14 devices to vpbias, meanwhile P7 will drive M13 source and P8 will drive M14 source to vpbias. Thus, they will be closed and not liable to stress. M6 drain will reach to vpbias, therefore no stress conditions. Using T1 transmission gate to cut pbias1 from terminal of R1 is necessary to prevent an undesirable effect. Otherwise, one terminal of R1 device is connected to vpbias and another terminal is connected to VDDH, which leads to constant current through R1 resistor. This in turn will bring unnecessary power con-

sumption. Aging simulations performed after those modifications have demonstrated that problems are solved: there are no changes in main parameters, no significant degradation neither in normal mode nor in power down mode (table 2). The changes in parameters of the designed rail-to-rail operational amplifier before and after proposed design updates, with 10 years aging simulation, are summarized in table 3.

Table 2
 V_{th} and I_{ds} variation for rail-to-rail operational amplifier after modifications

Transistor name	Normal operation mode		Power down mode	
	ΔV_{th} , mV	ΔI_{ds} , %	ΔV_{th} , mV	ΔI_{ds} , %
M1, M2	21	3.5	8	1.4
M5, M6	22	3.6	0.1	0.1
M10	18	2.7	0.1	0.1
M13, M14	28	3.9	0.1	0.1
P1, P2, P3	0.1	0.1	15	2.1
P4, P5, P6	0.1	0.1	15	2.1

Table 3
Simulation results for unmodified and proposed designs of rail-to-rail operational amplifier

Parameter	Before modifications	After modifications
DC gain, dB	40.1	52.3
ΔV_{th} , mV	252	28
ΔI_{ds} , %	22.4	3.9

Conclusion. New schematic solutions have been implemented to prevent stress conditions influence on devices. It has been demonstrated that proposed design updates improve the variation of I_{ds} and V_{th} parameters caused by aging degradation in 10 years lifetime, thus neutralizing the reduction in amplification factor.

References

1. Kundu S. Managing reliability of integrated circuits: Lifetime metering and design for healing. *2016 IEEE 25th Asian Test Symposium (ATS)*. Hiroshima, IEEE, 2016, p. 227. <https://doi.org/10.1109/ATS.2016.80>
2. Lorenz D. *Aging analysis of digital integrated circuits*, diss. for the Ph. D. (Eng.). Munich, 2012. 150 p.
3. Chen T., Sun Y., Shi Y., Li X., Liu Y. An applied model for HCI and lifetime prediction of LDMOSFET. *2022 IEEE 16th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT)*. Nanjing, IEEE, 2022, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICSICT55466.2022.9963390>
4. Zhang J., Jiang M., Zhang Q. W. An equivalent circuit model for negative bias temperature instability effect in 65nm PMOS. *2021 6th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*. Nanjing, IEEE, 2021, pp. 32–35. <https://doi.org/10.1109/ICICM54364.2021.9660347>
5. Gielen G., Maricau E., De Wit P. Analog circuit reliability in sub-32 nanometer CMOS: Analysis and mitigation. *2011 Design, Automation & Test in Europe*. Grenoble, IEEE, 2011, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DATE.2011.5763239>
6. Lorenzo M. A. G., Manzano A. A. S., Gusad M. T. A., Hizon J. R. F., Rosales M. D. Design and implementation of CMOS rail-to-rail operational amplifiers. *2007 International Symposium on Communications and Information Technologies*. Sydney, IEEE, 2007, pp. 61–66. <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2007.4391985>
7. *PrimeSim HSPICE Reference Manual: Commands and Control Options*. Synopsys Inc., 2020. 823 p.
8. Melikyan V., Martirosyan M., Melikyan A., Piliposyan G. 14nm Educational Design Kit: capabilities, deployment and future. *Proceedings of the 7th Small Systems Simulation Symposium*, 2018, February 12–14, Niš, Serbia. Niš, Faculty of Electronic Engineering, 2018, pp. 37–41.

9. *Custom Compiler Schematic Editor and Text Editor*, user guide. Synopsys Inc., 2021. 386 p.
10. Campbell Ph. What is Voltage Power Optimization? *Vanguards Power*. 2009. Available at: <http://vanguardspower.com/> (accessed: 12.01.2023).
11. Razavi B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. 2nd ed. New York, McGraw Hill, 2015. 782 p.
12. Kostanyan H., Harutyunyan S., Voskanyan G., Ghukasyan S. Transistor aging minimization method for multi output level converter design. *Vestnik RAU: fiziko-matematicheskije i estestvennyye nauki = Herald of Russian-Armenian (Slavonic) University: physica, mathematical and natural sciences*, 2022, no. 1, pp. 89–100. https://doi.org/10.48200/1829-0450_pmn_2022_1_89

The article was submitted 12.01.2023; approved after reviewing 26.01.2023;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Vazgen Sh. Melikyan – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Director of the University Programs “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), vazgenm@synopsys.com

Sevak A. Ghukasyan – PhD student of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Design Engineer of Analog and Mixed Signal Circuit, Senior Eng., “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), ghukasya@synopsys.com

Sergo S. Harutyunyan – PhD student of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Design Engineer of Analog and Mixed Signal Circuit, Eng. II, “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), sergo@synopsys.com

Garnik A. Voskanyan – PhD student of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Design Engineer of Analog and Mixed Signal Circuit, Senior Eng., “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), garnikv@synopsys.com

Narek A. Asatryan – Master’s degree student of the Microelectronic Circuits and Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Design Engineer of Analog and Mixed Signal Circuit, Eng. I, “Synopsys Armenia” CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), anarek@synopsys.com

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Научная статья
УДК 621.391.63:681.7.068
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-3-360-367
EDN: QRSPON

Исследование плоского угла зрения кремниевых фотоумножителей

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

Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Беларусь

o.kochergina@bsac.by

Аннотация. В настоящее время для регистрации оптического излучения, как правило, применяются многоэлементные лавинные фотоприемники – кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ). Однако не все характеристики данных фотоприемников изучены. Так, не исследованы зависимости плоского угла зрения Si-ФЭУ от напряжения питания и длины волны оптического излучения. В работе в качестве объектов исследования использованы Si-ФЭУ КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Установлено, что увеличение перенапряжения приводит к росту плоского угла зрения. Определено, что плоский угол зрения Si-ФЭУ имеет максимальное значение при длине волны оптического излучения $\lambda = 470$ нм и в диапазоне длин волн $\lambda = 380...750$ нм изменяется не более чем на 11 %. Полученные результаты могут найти применение при разработке и конструировании приборов и устройств для регистрации оптического излучения на основе Si-ФЭУ, при реализации технологии Li-Fi.

Ключевые слова: плоский угол зрения, кремниевый фотоумножитель, чувствительность

Для цитирования: Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Исследование плоского угла зрения кремниевых фотоумножителей // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 360–367. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-360-367>. – EDN: QRSPON.

Original article

Investigation of the flat viewing angle of silicon photomultipliers

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

Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

o.kochergina@bsac.by

Abstract. Currently, multi-element avalanche photodetectors – silicon photomultipliers (SiPM) – are often used to detect optical radiation. However, not all characteristics of these photodetectors are studied. So, the dependences of the flat viewing angle of SiPM on the supply voltage and wavelength of optical radiation are not investigated. In this work, silicon photomultipliers KOF5-1035 (RB), Ketek RM 3325, and ON Semi FC 30035 (Germany) were used as objects of study. It is found that an increase in the overvoltage results in an increase in the flat viewing angle. It has been determined that the flat viewing angle of the SiPM has a maximum value at an optical radiation wavelength $\lambda = 470$ nm and in the $\lambda = 380...750$ nm wavelength range it changes by no more than 11 %. The results obtained may find application, for example, in the development and design of instruments and devices for optical radiation detection based on SiPM, in the implementation of Li-Fi technology and other optical systems.

Keywords: flat viewing angle, silicon photomultiplier, sensitivity

For citation: Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of the flat viewing angle of silicon photomultipliers. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 360–367. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-360-367>. – EDN: QRSPON.

Введение. Технология Li-Fi [1–3], использующая передачу данных с помощью оптического излучения видимого диапазона, обеспечивает высокую скорость передачи информации [4, 5]. Перспективными для реализации технологии Li-Fi являются матричные лавинные фотоприемники – кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ), работающие в режиме Гейгера – Мюллера [6–8]. Si-ФЭУ имеют ряд преимуществ перед другими типами фотоприемников, используемых для реализации технологии Li-Fi. Так, по сравнению с электровакуумными фотоэлектронными умножителями они более компактны, имеют меньшее напряжение питания, хорошую механическую прочность и высокую чувствительность в видимой области спектра, по сравнению с одноэлементными лавинными фотоприемниками Si-ФЭУ характеризуются высоким коэффициентом усиления и большими площадями фоточувствительной поверхности.

Одна из наиболее важных характеристик фотоприемника при реализации технологии Li-Fi – плоский угол зрения β . Согласно [9] это угол в нормальной к фоточувствительной поверхности плоскости фотоприемника между направлениями падения параллельного пучка оптического излучения, при котором напряжение или ток фотосигнала фотоприемника уменьшается до заданного уровня. Особенность данной характеристики в том, что при реализации технологии Li-Fi используются оптическое излучение, попадающее от источника на фотоприемник нормально к его фоточувствительной по-

верхности, и излучение, отраженное или диффузно рассеянное. В связи с этим для реализации технологии Li-Fi следует выбирать фотоприемники с большим плоским углом зрения. Однако значения угла β Si-ФЭУ не определены для рабочего напряжения, не установлена его зависимость от напряжения питания и длины волны регистрируемого оптического излучения.

Цель настоящей статьи – определение плоского угла зрения β для рабочего напряжения Si-ФЭУ и установление зависимости от напряжения питания и длины волны регистрируемого оптического излучения.

Экспериментальная установка и методика измерений. В качестве объектов исследований выбраны серийно выпускаемые Si-ФЭУ КОФ5-1035 (Беларусь), Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 (Германия). На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки для проведения исследований.

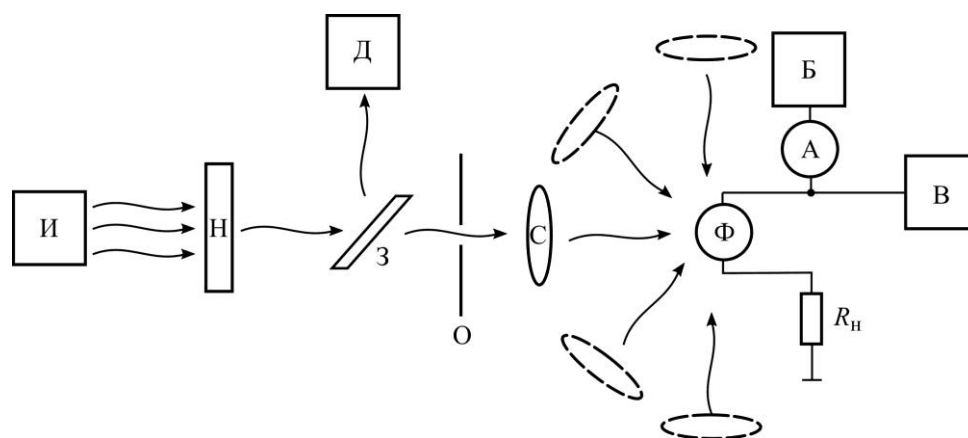


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: И – источник оптического излучения; Н – набор нейтральных светофильтров; З – полупрозрачное зеркало; Д – дозиметр оптического излучения; О – диафрагма; С – оптическая система; Ф – кремниевый фотоумножитель; А – амперметр; Б – блок питания; В – вольтметр; R_n – сопротивление нагрузки

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: И – source of optical radiation; Н – set of neutral light filters; З – translucent mirror; Д – optical radiation dosimeter; О – diaphragm; С – optical system; Ф – silicon photomultiplier; А – ammeter; Б – power supply; В – voltmeter; R_n – load resistance

Экспериментальная установка функционирует следующим образом. Пучок оптического излучения от источника постоянной интенсивности поступает на полупрозрачное зеркало через набор нейтральных светофильтров. В качестве источника оптического излучения использован набор светодиодов с длинами волн излучения в диапазоне 380–750 нм, что соответствует видимому спектру оптического излучения. Такой диапазон спектра излучения источника выбран в связи с его использованием для передачи данных в технологии Li-Fi. Набор нейтральных светофильтров позволяет ослаблять интенсивность оптического излучения в диапазоне 10^{-5} – 10^{-10} Вт/см². Полупрозрачное зеркало разделяет оптическое излучение на два пучка одинаковой интенсивности. Один из пучков поступает на дозиметр оптического излучения марки ЛД-07, другой – через диафрагму в оптическую систему, позволяющую направлять пучок излучения под разными углами α относительно нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ. Угол α изменяется от 90 до -90° . Система формирует такой диаметр пучка

оптического излучения, при котором пятно оптического излучения полностью покрывает квадратные фоточувствительные поверхности исследуемых Si-ФЭУ.

Геометрия расположения Si-ФЭУ в эксперименте такова, что расстояние l от выхода оптической системы до его фоточувствительной поверхности удовлетворяет условию $A/l \leq 0,01$, где A – длина стороны квадрата фоточувствительной поверхности [10]. Постоянное напряжение питания на Si-ФЭУ подается от блока питания, который изменяет напряжение, приложенное к Si-ФЭУ. Для ограничения тока, протекающего через Si-ФЭУ, подключено сопротивление нагрузки $R_n = 1$ кОм. Для измерения тока используется амперметр. Напряжение питания U_n , приложенное к Si-ФЭУ, определяется вольтметром. При закрытой диафрагме амперметр регистрирует темновой ток I_t . При открытой диафрагме амперметр измеряет общий ток I , определяемый суммой темнового тока I_t и фототока I_ϕ . Фототок определяется как разность между общим и темновым токами: $I_\phi = I - I_t$.

Поскольку исследуемые Si-ФЭУ имеют различные напряжения пробоя $U_{пр}$, то для сравнения их характеристик использовано перенапряжение $\Delta U = U_n - U_{пр}$. Исследования проводили в диапазоне перенапряжений от $-0,5$ до $1,0$ В. Для больших значений перенапряжений наблюдалось значительное увеличение темнового тока, что могло привести к тепловому пробое Si-ФЭУ. При меньших значениях перенапряжения коэффициент умножения Si-ФЭУ приблизительно равен единице. Напряжение пробоя определяли по ВАХ Si-ФЭУ при закрытой диафрагме по методике, описанной в работе [11]. Для каждого перенапряжения из исследуемого интервала подбирали интенсивность оптического излучения J , соответствующая динамическому диапазону Si-ФЭУ перенапряжения. Фототок зависит от интенсивности оптического излучения и чувствительности S Si-ФЭУ, определяемой по формуле $S = I_\phi/J$. При измерении угла β интенсивность оптического излучения оставалась постоянной.

Определяли зависимость фототока от угла падения α оптического излучения на фоточувствительную поверхность. По полученным данным вычисляли диаграмму направленности – зависимость S от α . Угол β определяется как сумма двух углов $|\beta_1|$ и $|\beta_2|$, лежащих в нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ и отложенных соответственно с правой и левой сторон от оси, проведенной под углом $\alpha = 0^\circ$ к такой плоскости. Углы $|\beta_1|$ и $|\beta_2|$ соответствуют направлению пучков оптического излучения, при которых чувствительность становится равной нулю. Все измерения проводили при комнатной температуре ($T = 293$ К). При измерении угла β выполнены требования по расходимости оптического пучка и погрешности измерений согласно [10].

Результаты измерений и их обсуждение. На рис. 2 представлены диаграммы направленности для $\Delta U = 0$ В и длины волны $\lambda = 470$ нм. При таком перенапряжении отношение сигнал / шум исследуемых фотоприемников имеет максимальное значение [12, 13], поэтому напряжение пробоя считается рабочим напряжением для исследуемых Si-ФЭУ. Выбранная длина волны соответствует максимуму спектральной чувствительности исследуемых Si-ФЭУ [14]. Для других длин волн диаграммы имеют аналогичный вид.

Как видно из рис. 2, максимальное значение чувствительности наблюдается при $\alpha = 0^\circ$ для всех исследуемых Si-ФЭУ. Так, $S = 1,2 \cdot 10^4$; $5,5 \cdot 10^4$; $7,8 \cdot 10^4$ А/Вт для Si-ФЭУ КОФ5-1035, ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325 соответственно. При построении диаграмм чувствительности нормированы на максимальное значение S_{max} для соответствующих Si-ФЭУ. Отметим, что полученные значения чувствительности симметричны справа и слева относительно оси, проведенной под углом $\alpha = 0^\circ$. При значениях $\alpha = \pm 60^\circ$ чувствительность Si-ФЭУ КОФ5-1035 уменьшается до $0,62S_{max}$. При изменениях угла α от 60 до 90° и от -60 до -90° чувствительность КОФ5-1035 уменьшается

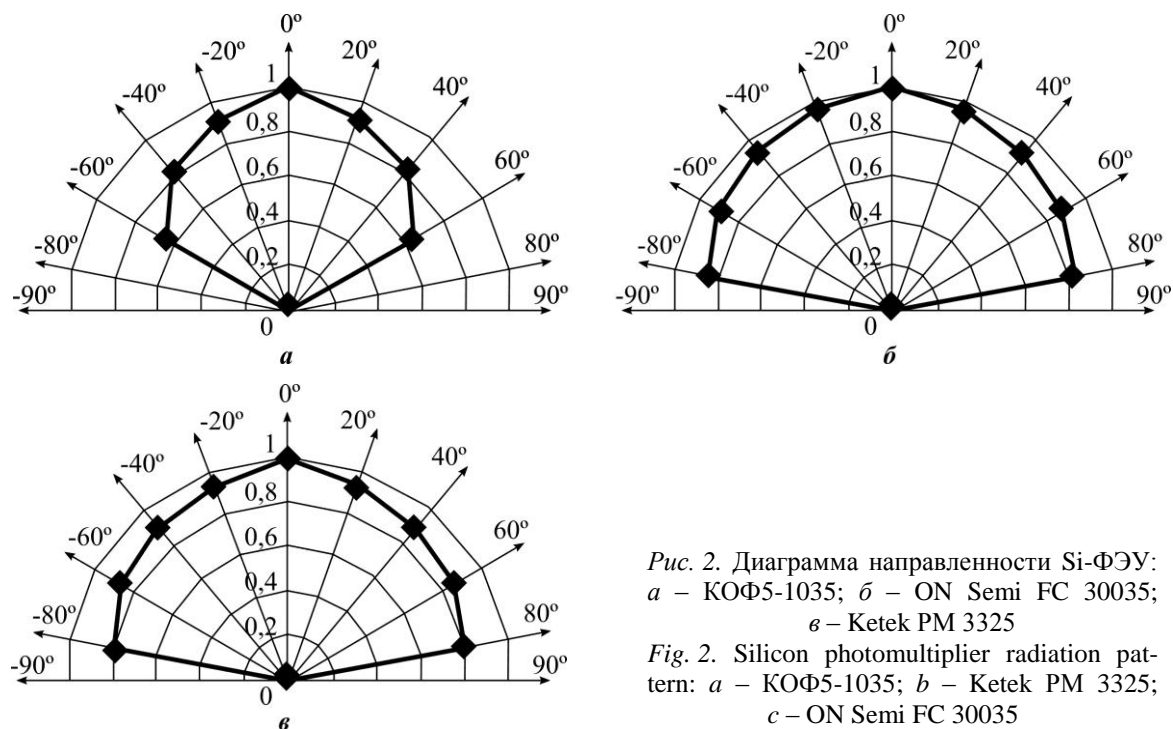


Рис. 2. Диаграмма направленности Si-ФЭУ: а – КОФ5-1035; б – ON Semi FC 30035; в – Ketek PM 3325
 Fig. 2. Silicon photomultiplier radiation pattern: a – КОФ5-1035; b – Ketek PM 3325; c – ON Semi FC 30035

до нуля (рис. 2, а). Для Si-ФЭУ ON Semi FC 30035 при $\alpha = \pm 80^\circ$ чувствительность уменьшается до $0,82S_{\max}$, а при изменениях угла α от 80 до 90° и от -80 до -90° чувствительность уменьшается до нуля (рис. 2, б). Для Si-ФЭУ Ketek PM 3325 при $\alpha = \pm 80^\circ$ чувствительность уменьшается до $0,80S_{\max}$, а при изменениях угла α от 80 до 90° и от -80 до -90° чувствительность уменьшается до нуля (рис. 2, в).

Угол β для исследуемых Si-ФЭУ при $\Delta U = 0$ В и длине волны регистрируемого оптического излучения $\lambda = 470$ нм имеет следующие значения: 160° для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035, 120° для КОФ5-1035. Различие в значениях угла β связано с тем, что для их изготовления использованы материалы с разными показателями преломления на границе воздух – фоточувствительная поверхность. Поэтому оптическое излучение, падающее на фоточувствительную поверхность под разными углами α , имеет разные значения коэффициента френелевского отражения. Угол β зависит от конструкции корпуса Si-ФЭУ. Отметим, что конструкции корпусов Si-ФЭУ Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 аналогичны, поэтому фотоприемники имеют одинаковые углы β . Конструкция корпуса КОФ5-1035 существенно отличается от конструкции корпусов других исследуемых Si-ФЭУ, поэтому значение угла β для данных Si-ФЭУ другое.

Установлено, что значение угла β зависит от перенапряжения для всех исследуемых Si-ФЭУ. Такие зависимости для длины волны оптического излучения $\lambda = 470$ нм представлены на рис. 3. Для других длин волн данные зависимости имеют аналогичные вид и поведение. Из рис. 3 видно, что увеличение перенапряжения от -0,5 до 0 В приводит к росту угла β , а зависимость угла β от перенапряжения практически пропорциональная и характеризуется коэффициентом $\Delta\beta/\Delta U_{\text{п}}$, где $\Delta\beta$ – изменение плоского угла зрения при изменении перенапряжения $\Delta U_{\text{п}}$. Коэффициент пропорциональности для всех зависимостей одинаковый и равен $\Delta\beta/\Delta U_{\text{п}} = 80,0$ градус/В. Дальнейшее увеличение перенапряжения практически не приводит к изменению угла β . Зависимость угла β от перенапряжения обусловлена тем, что чувствительность исследуемых Si-ФЭУ зави-

сит от перенапряжения [14]. При увеличении перенапряжения повышается чувствительность Si-ФЭУ. Повышение чувствительности приводит к тому, что для углов α часть оптического пучка излучения, не отраженная от фоточувствительной поверхности, а поглощенная в фотоприемнике, не регистрируется при небольших перенапряжениях. При повышении ΔU она начинает регистрироваться. Для $\Delta U > 0$ В регистрируется все поглощенное в фотоприемнике оптическое излучение.

Для исследуемого диапазона перенапряжения при $\Delta U = -0,5$ В угол $\beta = 80; 120; 120^\circ$ для КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 соответственно; при $\Delta U = 1$ В угол $\beta = 130, 170$ и 170° для КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 соответственно. Угол β рассматриваемых Si-ФЭУ в исследуемом диапазоне перенапряжений для всех длин волн оптического излучения изменяется примерно на 35 % для всех исследуемых фотоприемников.

На рис. 4 представлены зависимости угла β от длины волны оптического излучения λ при $\Delta U = 0$ В. Для других значений перенапряжений данные зависимости имеют аналогичный вид. Как видно из рисунка, зависимость угла β от длины волны оптического излучения незначительная.

Максимальное значение угол β принимает при длине волны $\lambda = 470$ нм, минимальное – при $\lambda = 750$ нм. Относительное отклонение значения угла β от среднего значения для Si-ФЭУ Ketek PM 3325 составило 3 %, ON Semi FC 30035 – 5 %, КОФ5-1035 – 4 %. Отклонение, по всей видимости, связано с зависимостями чувствительности и показателя преломления на границе воздух – фоточувствительная поверхность для исследуемых Si-ФЭУ от длины волны оптического излучения.

Вывод. Результаты проведенного исследования показали, что для рабочего напряжения питания и длины волны оптического излучения $\lambda = 470$ нм наибольший плоский угол зрения β имеют Si-ФЭУ Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035, а наименьший – КОФ5-1035. Определено, что при изменении длины волны оптического излучения в диапазоне 380–750 нм плоский угол зрения β изменяется для всех исследуемых Si-ФЭУ.

Установлено, что увеличение перенапряжения приводит к росту плоского угла зрения β . Сильная зависимость изменения плоского угла зрения от перенапряжения наблюдается в диапазоне перенапряжений от $-0,5$ до 0 В и слабая – от 0 до 1 В, что обусловлено характером зависимости чувствительности от напряжения питания исследуемых фотоприемников.

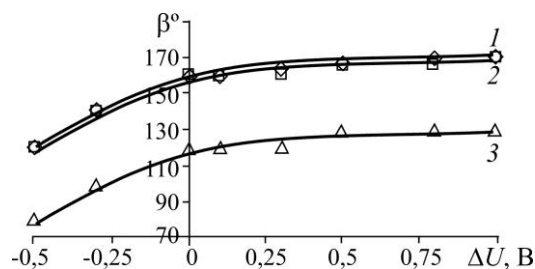


Рис. 3. Зависимость плоского угла зрения β от перенапряжения ΔU : 1 – Ketek PM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – КОФ5-1035

Fig. 3. The dependence of the flat viewing angle β on the magnitude of the overvoltage ΔU : 1 – Ketek PM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – КОФ5-1035

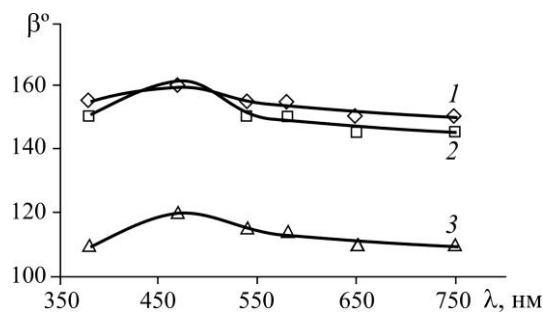


Рис. 4. Зависимость плоского угла зрения β от длины волны оптического излучения λ : 1 – Ketek PM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – КОФ5-1035

Fig. 4. The dependence of the flat viewing angle β on the wavelength of optical radiation λ : 1 – Ketek PM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – КОФ5-1035

Литература

1. Arya V., Priya P., Omanakuttan R., Baby S. LiFi: The future technology in wireless communication // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2015. Vol. 4. Iss. 4. P. 2340–2343.
2. Sarkar A., Agarwal S., Nath A. Li-Fi technology: Data transmission through visible light // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. 2015. Vol. 3. Iss. 6. P. 1–12.
3. Макаренко В. Технология LI-FI как альтернатива WI-FI // ЭЖиС. 2020. № 1 (229). С. 46–51.
4. Исследование пропускной способности оптического канала с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя / В. Б. Залесский, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 27. № 1. С. 50–58. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-50-58>
5. Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Исследование пропускной способности оптического канала связи с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя в условиях фоновой засветки // Прикладная физика. 2022. № 1. С. 28–33. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-28-33>
6. A comprehensive model of the response of silicon photomultipliers / H. T. van Dam, S. Seifert, R. Vinke et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010. Vol. 57. No. 4. P. 2254–2266. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2053048>
7. Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. Two-photon imaging with silicon photomultipliers // Optics Express. 2019. Vol. 27. Iss. 24. P. 35830–35841. <https://doi.org/10.1364/OE.27.035830>
8. Кремниевый фотоэлектронный умножитель: новые возможности / С. Клемин, Ю. Кузнецов, Л. Филатов и др. // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2007. № 8 (82). С. 80–86. EDN MXFDPF.
9. ГОСТ Р 59605–2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. IV, 41 с.
10. ГОСТ Р 59607–2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. IV, 53 с.
11. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем. Минск: ВГКС, 2012. 276 с.
12. Работа кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой $p+-p-n+$ в режиме одноквантовой регистрации / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина и др. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя фізіка-тэхнічных навук. 2020. Т. 65. № 3. С. 348–355. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>
13. Silicon photomultipliers signal-to-noise ratio in the continuous wave regime / G. Adamo, A. Parisi, S. Stivala et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. Vol. 20. Iss. 6. P. 284–290. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2346489>
14. Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 2. С. 164–171. EDN FWZGRZ.

Статья поступила в редакцию 09.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.01.2023 г.; принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

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

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

Кочергина Ольга Викторовна – аспирант кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи (Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8, стр. 2), o.kochergina@bsac.by

References

1. Arya V., Priya P., Omanakuttan R., Baby S. LiFi: The future technology in wireless communication. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2015, vol. 4, iss. 4, pp. 2340–2343.
2. Sarkar A., Agarwal S., Nath A. Li-Fi technology: Data transmission through visible light. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 2015, vol. 3, iss. 6, pp. 1–12.
3. Makarenko V. LI-FI technology as an alternative to WI-FI. *EKiS = Electronic Components and Systems*, 2020, no. 1 (229), pp. 46–51. (In Russian).
4. Zalessky V. B., Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Tsymbal V. S. Investigation of the optical communication channel throughput with an information receiver in the form of a silicon photomultiplier. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 50–58. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-50-58>
5. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of the optical communication channel throughput of an information receiver in the form of a silicon photomultiplier tube under conditions of background illumination. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2022, no. 1, pp. 28–33. (In Russian). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-28-33>
6. Van Dam H. T., Seifert S., Vinke R., Dendooven P., Löhner H., Beekman F. J., Schaart D. R. A comprehensive model of the response of silicon photomultipliers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 2254–2266. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2053048>
7. Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. Two-photon imaging with silicon photomultipliers. *Optics Express*, 2019, vol. 27, iss. 24, pp. 35830–35841. <https://doi.org/10.1364/OE.27.035830>
8. Clemin S., Kuznetsov J., Filatov L., Budjan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Popova E. Silicon photoelectronic multiplier. New opportunity. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8 (82), pp. 80–86. (In Russian). EDN MXFDPF.
9. *GOST R 59605–2021. Optics and photonics. Semiconducting photoelectric detectors. Photoelectric and photoreceiving devices. Terms and definitions*. Moscow, Ros. in-t standartizatsii Publ., 2021. iv, 41 p. (In Russian).
10. *GOST R 59607–2021. Optics and photonics. Semiconducting photoelectric detectors. Photoelectric and photoreceiving devices. Methods of measuring photoelectric parameters and determining characteristics*. Moscow, Ros. in-t standartizatsii Publ., 2021. iv, 53 p. (In Russian).
11. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photoreceivers of quantum systems*. Minsk, VGKS Publ., 2012. 276 p. (In Russian).
12. Asayonak M. A., Zenevich A. O., Kacharhina V. V., Novikov Ya. V., Saroka S. A. Operation of silicon photoelectronic multipliers with the structure p+p-n+ in the single quantum registration mode. *Vyestsi Natsyyanal'nyy akademii navuk Byelarusi. Syeryyya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 348–355. (In Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>
13. Adamo G., Parisi A., Stivala S., Tomasino A., Agrò D., Curcio L., Giaconia G. C., Busacca A., Fallica G. Silicon photomultipliers signal-to-noise ratio in the continuous wave regime. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, vol. 20, iss. 6, pp. 284–290. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2346489>
14. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of the spectral characteristics of silicon photomultiplier tubes. *Uspekhi prikladnoy fiziki = Advances in Applied Physics*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 164–171. (In Russian). EDN FWZGRZ.

The article was submitted 09.01.2023; approved after reviewing 23.01.2023;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

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

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

Olga V. Kochergina – PhD student of the Mathematics and Physics Department, Belarusian State Academy of Communications (Belarus, 220114, Minsk, F. Skorina st., 8, bld. 2), o.kochergina@bsac.by

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.9:004.6:004.8
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-3-368-377
EDN: QFVSFA

Метод формирования контента для тематических порталов на основе интеллектуального анализа данных

Ю. С. Шевнина, Л. Г. Гагарина, М. А. Климочкина, Т. В. Попова

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

yusm@rambler.ru

Аннотация. Современные порталы формируют контент для каждого посетителя на основе рекомендательного сервиса, использующего анализ и подсчет меток. Для тематических информационных порталов набор унифицированных терминов и понятий в качестве названий параметров поиска не всегда соответствует потребностям аудитории. Использование похожих страниц и элементов контента для образовательных, научно-технических, промышленных и других корпоративных порталов в сочетании с большим объемом данных для всех категорий посетителей снижает эффективность использования информации, что делает проблему особенно актуальной. В работе представлен метод формирования контента для тематических информационных порталов на основе анализа данных пользовательских сессий с применением искусственного интеллекта. Особенностью метода является использование шаблона представления элемента контента портала, позволяющего представлять содержимое портала в иерархическом виде и параметризовать его. Параметризация контента построена на основе интеллектуального анализа истории посещений тематического информационного портала с выделением отдельных элементов контента и расчетом для них весовых коэффициентов. Показано, что использование весовых коэффициентов позволяет составлять релевантные рекомендации по содержанию портала для возвратных посетителей. Рассмотрен пример использования предлагаемого метода формирования контента для корпоративного портала предприятия микроэлектроники, состоящего из внешней и внутренней областей. Информационные и новостные блоки внешней области корпоративного портала построены с использованием предлагаемого метода формирования контента для тематического портала. Учебный, производственный и научные блоки внутренней области портала также построены на основе предлагаемого метода. Использование рассмотренного метода формирования контента

© Ю. С. Шевнина, Л. Г. Гагарина, М. А. Климочкина, Т. В. Попова, 2023

для корпоративного портала позволяет сузить и персонализировать информационные потоки за счет сокращения и адаптации элементов контента с учетом направления деятельности пользователей, что повышает эффективность использования и качество предоставляемых на портале данных и функций.

Ключевые слова: тематический информационный портал, шаблонизатор, интеллектуальный анализ данных, рекомендации

Для цитирования: Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Klimochkina М. А., Попова Т. В. Метод формирования контента для тематических порталов на основе интеллектуального анализа данных // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 368–377. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-368-377>. – EDN: QFVSFA.

Original article

Method of content formation for thematic portals based on data mining

Yu. S. Shevnina, L. G. Gagarina, M. A. Klimochkina, T. V. Popova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

yusm@rambler.ru

Abstract. Modern portals are forming content for each visitor based on recommendation engine using tag analysis and calculation. A set of standardized terms and concepts serving for thematic information portals as search parameter names is not always fitting the audience's needs. The use of similar pages and content elements for education, scientific and engineering, industrial and other corporate portals, combined with large amount of data for all categories of visitors, lowers information efficiency, which makes the issue really pressing. In this work, a method of content formation for thematic information portals based on the analysis of user session data using artificial intelligence methods is presented. A feature of this method is the use of the portal content element presentation template, which allows presenting the portal content in a hierarchical form and parameterizing it. Content parameterization is built based on an intellectual analysis of the history of visits to the thematic information portal with the selection of individual content elements and the calculation of weight coefficients for them. It has been shown that the use of weighting factors allows making relevant recommendations on the portal content for returning visitors. An example is considered of using the proposed content formation method for a microelectronics enterprise's corporate portal that consists of two parts: external and internal areas. Information and news blocks of the external part of the corporate portal are built using the proposed method of content formation for the thematic portal. Educational, industrial, and scientific blocks of the internal part of the portal are also built based on the proposed method. The use of the considered method of content formation for the corporate portal makes it possible to narrow and personalize information flows by reducing and adapting content elements with account for user activities direction, which increases the efficiency of use and the quality of data and functions provided on the portal.

Keywords: thematic information portal, template engine, data mining, recommendations

For citation: Shevnina Yu. S., Gagarina L. G., Klimochkina M. A., Popova T. V. Method of content formation for thematic portals based on data mining. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 368–377. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-3-368-377](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-368-377). – EDN: QFVSFA.

Введение. Развитие информационных технологий и их практическое применение в различных предметных областях привели к появлению большого количества тематических информационных систем, порталов, сайтов с широкой пользовательской аудиторией и большим объемом данных. Аналитическое исследование таких открытых информационных систем, порталов и сайтов позволило выделить в их структуре повторяющиеся блоки контента рекламного и настроечного характера [1].

Современные порталы формируют контент для каждого посетителя на основе рекомендательного сервиса, использующего анализ и подсчет меток, предоставляемых посетителями автоматически или вручную на интересующих их материалах. Кроме того, пользователи имеют возможность задавать поисковые параметры для отбора необходимой им информации через специальный поисковый интерфейс, использующий, как правило, унифицированные термины и понятия, применяемые в различных предметных областях. Следует отметить, что для узкоспециализированных информационных порталов такой набор терминов и понятий в качестве названий параметров поиска не всегда соответствует потребностям посетителей [2]. Использование похожих страниц и элементов контента для образовательных, научно-технических, промышленных и других корпоративных порталов в сочетании с большим объемом данных для всех категорий посетителей приводит к снижению эффективности использования и качества предоставляемой информации, что делает проблему особенно актуальной.

В настоящей работе рассматривается метод формирования контента для тематических информационных порталов на основе искусственного интеллекта с использованием шаблонов и анализа данных.

Способы формирования контента тематических порталов. Применяемые на сегодняшний день технологии агрегации и формирования контента тематических информационных порталов основаны на использовании формата Rich Site Summary (RSS), позволяющего создавать описания статей или их анонсов со ссылкой на полную версию текста с применением xml-формата. Создаваемые с использованием RSS-модуля так называемые RSS-ленты позволяют находить и агрегировать данные с большого количества тематических порталов и других различных каналов информации. При этом тематический информационный портал (или сайт) должны иметь RSS-канал, позволяющий передавать данные в RSS-формате. Преимуществами RSS-модуля являются добавление на портал контента с различных источников, расширение аудитории портала, простое техническое решение, сокращение времени на публикацию анонсов статей. Недостатки: увеличение тематического охвата портала, отсутствие параметров для управления содержимым RSS-ленты и элементами контента, отсутствие параметров для настройки рекомендательного показа [3].

Метод формирования контента информационных тематических порталов на основе интеллектуального анализа данных предполагает кросс-платформенную реализацию, что делает возможным его использование в различных средах разработки и поддержки информационных систем и является неоспоримым преимуществом [4]. Кроме того, метод позволяет решить задачу сужения и персонализации информационных потоков

за счет сокращения и адаптации элементов контента с учетом направления деятельности пользователей, что повышает эффективность использования и качество предоставляемых на портале данных и функций.

Шаблоны представления элементов контента. В процессе исследования способов формирования содержимого тематических порталов определены структура шаблона представления элемента контента и последовательность этапов его параметризации: 1) определение терминов и понятий предметной области тематического портала с применением методов онтологического анализа с целью дальнейшей замены соответствующих унифицированных названий элементов контента; 2) составление списка рекомендаций, состоящего из элементов контента и функций, для пользователей тематического портала с использованием методов искусственного интеллекта; 3) определение и внесение параметров в шаблон представления элемента контента.

Структурная схема шаблона представления элемента контента состоит из двух частей (рис. 1): список шаблонов представления элемента контента, используемых на тематическом информационном портале, и список прогнозируемых параметров поиска элементов контента и другие рекомендации по ограничению информационных потоков, поступающих к пользователю. Список шаблонов представления элемента контента состоит из наименований и идентификаторов шаблонов. Одной из составных частей шаблона представления элемента контента является прогнозируемый набор параметров поиска для каждого возвратного посетителя, полученный на основе интеллектуального анализа истории посещений страниц портала и других цифровых следов пользователя. Автоматическое формирование такого поискового запроса ограждает посетителя от лишних действий, что особенно важно для тех, кто не имеет навыков работы со специализированными информационными порталами [3, 4].



Рис. 1. Структурная схема шаблона представления элемента контента
Fig. 1. Block diagram of the content element presentation template

Параметры по сужению и персонализации информационных потоков, поступающих к пользователю информационного тематического портала, в предлагаемом решении делятся на три группы: параметры поиска, параметры отображаемых элементов и параметры внешнего представления. Параметры поиска используются для быстрого подбора необходимой пользователю информации и представляют собой пары: название унифицированного элемента контента и его значение при поиске [5]. Список параметров поиска формируется в результате анализа истории посещений и цифровых следов возвратных посетителей тематического информационного портала с использованием методов искусственного интеллекта. В качестве параметров отображаемых элементов используются идентификаторы элементов контента, упорядоченных по релевантности потребностям и интересам пользователей порталов, также полученных на основе анализа истории посещений. Персонализация пользовательских интерфейсов тематического информационного портала осуществляется с использованием параметров внешнего представления, в которых указывается стилевое решение, предпочитаемое пользователем.

Формирование содержимого тематического информационного портала. При формировании содержимого тематического информационного портала шаблон представления элемента контента обрабатывается с помощью последовательного вызова обработчиков событий $R = \{r_1, \dots, r_n\}$, называемого очередью. При этом очередь построена так, что новые события помещаются в ее конец. Событие состоит из одного или нескольких блоков команд, обрабатывающих компоненты шаблона представления элемента контента.

Рассмотрим обработку шаблона представления элемента контента с помощью последовательного вызова обработчиков событий. Предположим, что в очереди присутствует только одно событие r , тогда $R_0 = \{r\}$, H_1r – события, которые возникают в результате обработки события r . Если $H_1r \neq \emptyset$, то процесс обработки будет продолжаться. $H_n r$ – последовательность событий, возникающих при обработке предыдущей последовательности $H_{n-1}r$. При этом если предыдущая последовательность $H_{n-1}r$ пуста, то и последовательность $H_n r$ пуста [6]. Шаблон представления элемента контента имеет иерархическую структуру. Следовательно, формируемый на основе такого шаблона контент тематического портала также иерархичен и представляет собой дерево. При этом иерархическая структура такова, что допускается расположение нескольких элементов контента на одном уровне.

Таким образом, иерархический уровень $i(T_i)$ содержит все вершины дерева, соответствующие элементам контента тематического портала и полученные на i -м шаге обработки очереди R . Количество уровней в иерархической структуре равно числу шагов n по обработке шаблона представления элемента контента тематического информационного портала. Для построения дерева, соответствующего иерархической структуре шаблона представления элемента контента, необходимо выбрать одно событие r , которое станет корнем дерева $T_0 = \{r\}$. Далее для каждой вершины дерева $s \in T_{n-1} : H_1s \neq \emptyset$ необходимо добавить элементы последовательности событий H_1s . При $H_1s = \emptyset$ дерево построено.

Рассмотрим построение элемента контента в виде выпадающего списка с разграниченным доступом для различных ролей пользователей портала. Допустим, r – событие по обработке элемента контента в виде выпадающего списка, g – событие по добавлению значения списка, ar – событие по обработке правила доступа к элементу контента,

fr – событие по добавлению описания правила доступа к элементу контента, ag – событие по обработке правила доступа к значению списка, fg – событие по добавлению описания правила доступа к значению списка. Тогда получим $H_1r = \{g, ar\}$, $H_1g = \{ag\}$, $H_1ar = \{fr\}$, $H_1ag = \{fg\}$, $H_1fr = \emptyset$, $H_1fg = \emptyset$. На рис. 2 показано дерево для элемента интерфейса тематического портала.

С учетом того что последовательность вызовов обработчиков событий состоит из конечного числа элементов, дерево для элемента интерфейса тематического портала содержит не более $|E|$ уровней. Таким образом, любая вершина k -го уровня содержит не более $|E|-k$.

Следовательно, каждый иерархический уровень состоит из конечного числа элементов:

$$p_k = \frac{(E-1)!}{(E-k)!}, \quad k = \overline{1, |E|}.$$

Количество вершин дерева определяется формулой

$$V = \sum_{k=1}^E p_k = \sum_{k=1}^E \frac{(E-1)!}{(E-k)!}.$$

Итак, количество вершин дерева равно количеству шагов по обработке шаблона представления элемента контента тематического портала.

Составление рекомендаций по выбору материалов для пользователей портала на основе интеллектуального анализа истории посещений. Для повышения точности составления рекомендаций предлагается для каждого элемента контента тематического информационного портала определять весовой коэффициент a_i :

$$a_i = \frac{N_i}{M},$$

где N_i – количество просмотров выделенного элемента контента; M – общее количество элементов контента тематического информационного портала.

Физический смысл данного весового коэффициента заключается в релевантности элемента контента интересам и потребностям пользователя портала. Как видно из приведенного уравнения, значение коэффициента варьируется от 0 до 1. При этом значение 1 соответствует наиболее релевантному элементу контента при составлении рекомендаций для пользователей портала, а значение 0 – элементу контента, не оказывающему влияния на определение рекомендаций для пользователя тематического информационного портала [7].

Оценка интересов и потребностей пользователей портала при составлении рекомендаций. После определения релевантности элемента контента интересам пользователя корпоративного информационного портала для каждого элемента контента формируется граф $D = (V, E)$, в котором вершинами V будут элементы контента, оп-

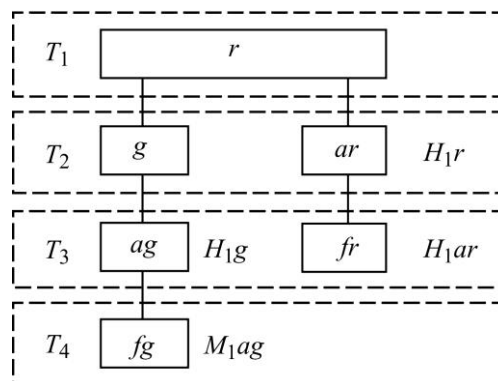


Рис. 2. Дерево для элемента интерфейса тематического портала

Fig. 2. Tree for the thematic portal interface element

ределенные в шаблоне представления, ребрами $E = (u, v) : u, v \in V$ – связи между ними, вес ребра равен релевантности элемента контента интересам пользователя (весовому коэффициенту). Далее строится аналогичный по структуре граф связанности интересов и потребностей пользователей $D' = (V, E)$, полученный на основе интеллектуального анализа истории посещений тематического информационного портала [1, 6]. Сравнение вершин полученных графов проводится с учетом положений нечеткой логики:

$$V \subset V' \Leftrightarrow \forall v \in V : \mu_V(v) \leq \mu_{V'}(v),$$

$$l(V \subset V') = \min_{v \in T} \mu_{V'}(v) : T = \{v \in V; \mu_V(v) \leq \mu_{V'}(v); \mu_V(v) > 0\}.$$

При соответствии вершин графов узлы графа рекомендаций маркируются. Для расчета комплексной оценки интересов пользователей и формирования рекомендаций по контенту необходимо рассчитать длину пути между маркированными узлами графа рекомендаций. Если $e_{i,j}$ – ребро, соединяющее две вершины v_i и v_j , и весовая функция $f : E \rightarrow \mathbb{R}$, тогда путь G между маркированными узлами рассчитывается как

$$G = \sum_{i=1}^{n-1} f(e_i, e_{i+1}).$$

В существующих методах формирования рекомендаций для пользователей тематических информационных порталов особую сложность представляет нечеткое определение интересов, в том числе и с использованием методов искусственного интеллекта. Предлагаемый авторами метод формирования контента для тематических информационных порталов позволяет уменьшить нечеткость сравниваемых множеств и повысить общую релевантность составленных рекомендаций за счет поочередного сравнения элементов контента и соответствующих им интересов пользователей.

Формирование контента для корпоративного портала предприятия микроэлектроники. Корпоративный портал предприятия микроэлектроники разделен на внешнюю и внутреннюю области. Внешняя область корпоративного портала (рис. 3, а) визуальна и информационно одинакова для всех посетителей и содержит новостные и информационные материалы о предприятии микроэлектроники, а также каталог продукции, которые формируются на основе анализа истории посещений возвратных посетителей. Для новых посетителей информация отображается в полном объеме.

Внутренняя область корпоративного портала предприятия микроэлектроники (рис. 3, б) доступна только для сотрудников. Для перехода к ней сотрудники предприятия должны авторизоваться. Внутренняя область содержит рабочие документы, нормативные материалы, информацию о предстоящих и прошедших мероприятиях, а также внешние информационные и новостные материалы.

Отдельную часть внутренней области корпоративного портала предприятия микроэлектроники занимает рабочая зона (рис. 3, в), состоящая из учебного, производственного, научного блоков и блока управления предприятием. Блок управления предприятием интегрирован с используемой автоматизированной системой управления производством и позволяет получать статистические отчеты по реализации технологических процессов для принятия управленческих решений [4].

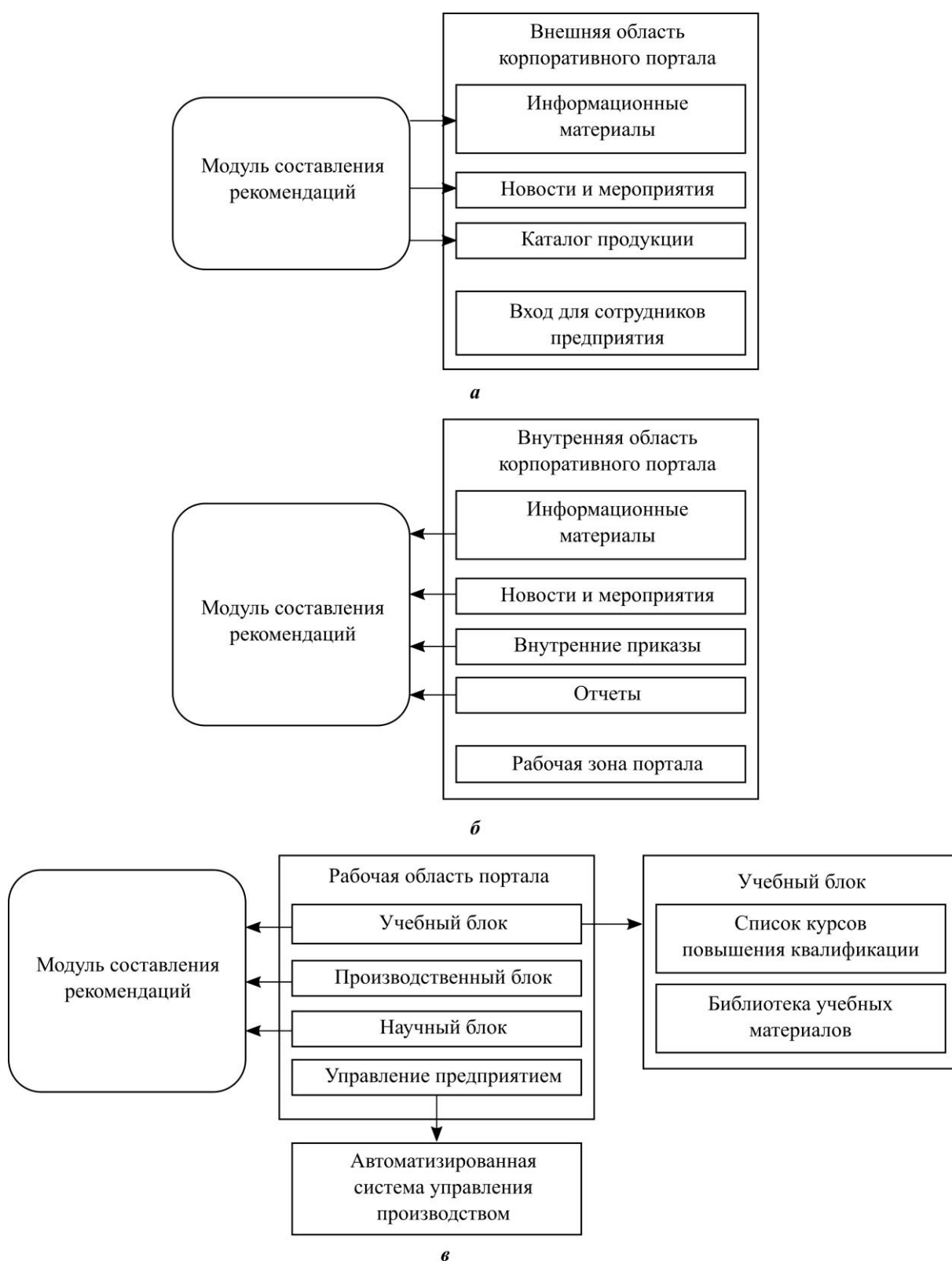


Рис. 3. Структурные схемы внешней области (а), внутренней области (б) и рабочей зоны (в) корпоративного портала предприятия микроэлектроники
 Fig. 3. Block diagrams of the external area (a), internal area (b) and working area (c) of the corporate portal of a microelectronics enterprise

Заключение. Предложенный метод формирования контента для тематических порталов на основе анализа данных пользовательских сессий с применением методов искусственного интеллекта предназначен для разработки административной и клиентской частей новостных, корпоративных, образовательных, научно-технических и промышленных порталов (или сайтов) с большим объемом содержимого и посетителей (свыше 1000 человек в сутки). Использование шаблонов представления элементов контента и обработки данных пользовательских сессий методами искусственного интеллекта позволяет предоставлять посетителям тематических информационных порталов только необходимую им информацию.

Реализация предлагаемого метода формирования контента на примере корпоративного портала для предприятия микроэлектроники позволяет сузить и персонализировать информационные потоки за счет сокращения и адаптации элементов контента с учетом направления деятельности пользователей. Это повышает эффективность использования и качество предоставляемых на портале данных и функций.

Литература

1. **Шевнина Ю. С.** Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 3. С. 407–415. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415>
2. **Лекун Я.** Как учится машина: революция в области нейронных сетей и глубокого обучения / при участии К. Бризар; пер. с фр. Е. Арсеновой. М.: Альпина ПРО, 2021. 334 с.
3. **Шевнина Ю. С.** Метод декомпозиции сложной нелинейной системы на основе процессного подхода // Системы управления и информационные технологии. 2021. № 3 (85). С. 24–29. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.85.3.005>
4. **Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г.** Подходы к автоматизации процессов центров коллективного проектирования микроэлектроники // Информационные технологии и вычислительные системы. 2021. № 4. С. 12–25. <https://doi.org/10.14357/20718632210402>
5. **Кузьмич Р. И., Масич И. С., Ступина А. А.** Модели формирования закономерностей в методе логического анализа данных // Системы управления и информационные технологии. 2017. № 1 (67). С. 33–37.
6. **Fürnkranz J., Gamberger D., Lavrač N.** Foundations of rule learning. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. XVIII, 334 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75197-7>
7. **Zimmermann A., De Raedt L.** Cluster grouping: from subgroup discovery to clustering // Mach. Learn. 2009. Vol. 77. Iss. 1. P. 125–159. <https://doi.org/10.1007/s10994-009-5121-y>

Статья поступила в редакцию 15.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 28.12.2022 г.; принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Шевнина Юлия Сергеевна – кандидат технических наук, доцент Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yusm@rambler.ru

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gagar@bk.ru

Климочкина Мария Анатольевна – доцент кафедры инженерной графики и дизайна Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), klimansha@mail.ru

Попова Татьяна Владимировна – кандидат исторических наук, доцент Института высокотехнологичного права, социальных и гуманитарных наук Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ms.popova.tatiana@mail.ru

References

1. Shevnina Ju. S. Method for estimating the state of a nonlinear system based on logical data analysis. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 407–415. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415>
2. Le Cun Y. *Quand la machine apprend: La révolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond*, avec la collab. de C. Brizard. Paris, Odile Jacob, 2019. 394 p. (In French).
3. Shevnina Ju. S. Decomposition method for a complex nonlinear system based on a process approach. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii = Automation and Remote Control*, 2021, no. 3 (85), pp. 24–29. (In Russian). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.85.3.005>
4. Shevnina Ju. S., Gagarina L. G. Approaches to process automation of collective design centers for microelectronics. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2021, no. 4, pp. 12–25. (In Russian). <https://doi.org/10.14357/20718632210402>
5. Kuzmich R. I., Masich I. S., Stupina A. A. Models for formation of patterns in the method of logical analysis of data. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii = Automation and Remote Control*, 2017, no. 1 (67), pp. 33–37. (In Russian).
6. Fürnkranz J., Gamberger D., Lavrač N. *Foundations of rule learning*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012. xviii, 334 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75197-7>
7. Zimmermann A., De Raedt L. Cluster grouping: from subgroup discovery to clustering. *Mach. Learn.*, 2009, vol. 77, iss. 1, pp. 125–159. <https://doi.org/10.1007/s10994-009-5121-y>

The article was submitted 15.12.2022; approved after reviewing 28.12.2022;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Yulia S. Shevnina – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yusm@rambler.ru

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gagar@bk.ru

Maria A. Klimochkina – Assoc. Prof. of the Engineering Graphics and Design Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), klimansha@mail.ru

Tatyana V. Popova – Cand. Sci. (Hist.), Assoc. Prof. of the Institute for Advanced Law, Social Sciences and Humanities, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ms.popova.tatiana@mail.ru

Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений

И. Л. Щербов

*Донецкий национальный технический университет, г. Донецк,
Россия*

scherbov@yandex.ru

Аннотация. Повышение точности и достоверности получаемой информации о траектории движения летательных аппаратов необходимо для принятия обоснованных решений о характеристиках испытуемого объекта и качестве работы его бортовых навигационных систем. Применяемые методы обработки траекторной информации имеют ряд недостатков, приводящих к потере точности обработки из-за отсутствия учета совместной реализации пространственной и временной избыточности. В работе представлены результаты проверки качества работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания, учитывающего пространственную и временную избыточность получаемых данных измерений, при радиолокационном контроле летательного аппарата на типовой траектории полета. Проведено сравнение полученных результатов с результатами работы алгоритма неадаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений. Апробация работы адаптивного алгоритма проведена методом имитационного моделирования. Показано, что по качеству работы предложенный адаптивный алгоритм независимо от количества точек на интервале локально скользящего сглаживания при различных степенях сглаживающего полинома не уступает неадаптивному алгоритму и даже превосходит его.

Ключевые слова: алгоритм адаптивного нелинейного оптимального сглаживания, информационная технология, внешнетраекторные измерения, совместная обработка избыточных данных, имитационное моделирование

Для цитирования: Щербов И. Л. Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 378–384. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-378-384>. – EDN: NJENWV.

Original article

Approbation of the algorithm for adaptive nonlinear optimal smoothing of multiple trajectory measurement data

I. L. Shcherbov

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

shcherbov@yandex.ru

Abstract. Improvement in accuracy and reliability of received information about motion trajectory of aircrafts is necessary for reasoned decision making about test object characteristics and its onboard navigation systems work quality. The methods used for trajectory information processing have a number of disadvantages leading to processing accuracy loss due to the lack of consideration for joint implementation of special and temporal redundancy. In this work, the results are presented of operation quality testing of algorithm for adaptive nonlinear optimal smoothing, considering spatial and temporal redundancy of received measurement data, during radar control of aircraft on the typical flight path, along with obtained results comparison with output of algorithm for non-adaptive nonlinear optimal smoothing of multiple measurement data. Adaptive algorithm approbation was carried out by simulation method. It has been demonstrated that in terms of work quality the proposed adaptive algorithm, regardless of the number of points in the interval of locally sliding smoothing, for various degrees of the smoothing polynomial, is not inferior but even superior to the non-adaptive algorithm.

Keywords: adaptive nonlinear optimal smoothing algorithm, information technology, external trajectory measurement, overlapped processing of redundant data, simulation modeling

For citation: Shcherbov I. L. Approbation of the algorithm for adaptive nonlinear optimal smoothing of multiple trajectory measurement data. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 378–384. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-3-378-384](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-378-384). – EDN: NJENWV.

Введение. Совершенствование систем сбора и обработки информации о летательных аппаратах (ЛА), перемещающихся по стохастическим траекториям, позволяет повысить достоверность и точность ее оценки и сократить время обработки. Наиболее перспективным подходом к решению данной задачи является автоматизация управленческого процесса обработки данных внешнетраекторных измерений за счет совершенствования применяемого математического аппарата. Используемые информационно-измерительные комплексы обеспечивают сбор необходимой информации о стохастической траектории движения ЛА для анализа проведенных испытаний. Достоверность полученной информации позволяет принять обоснованное решение о характеристиках испытуемого объекта и качестве работы его бортовых навигационных систем. В дальнейшем это позволит избежать негативных последствий при эксплуатации испытуемого ЛА.

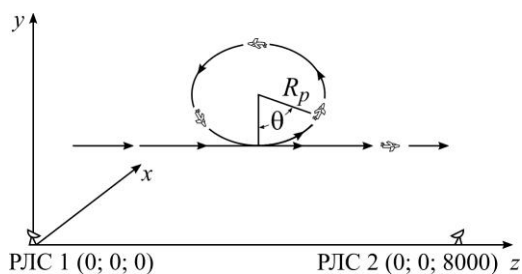
Существующие методы обработки получаемой информации о стохастической траектории движения ЛА сводятся к нахождению точки пересечения трех поверхностей положения. Широкое распространение и использование алгоритмов преобразования координат обосновано их простотой. Однако многообразие и отсутствие универсальности широко применяемых методов обработки, обуславливающих увеличение сроков обработки данных измерений, наличие зон низкой точности, отсутствие учета пространственной и временной избыточности, приводящих к потере точности в процессе обработки, относятся к их недостаткам [1–3]. Таким образом, актуальной научно-технической задачей, имеющей практическое значение, является создание информационной технологии совместной обработки избыточных данных измерений.

Цель настоящей статьи – анализ качества работы адаптивного и неадаптивного алгоритмов.

Моделирование работы адаптивного алгоритма. В работах [4–7] для повышения определения точности положения ЛА при перемещении по стохастическим траекториям используется полиномиальное описание данных траекторий. Для этого применяется система ортогональных базисных функций. Вектор коэффициентов сглаживающего полинома определяется разработанным универсальным итеративным алгоритмом.

На основании проведенных исследований предлагается алгоритм адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений [8]. Адаптивный алгоритм позволяет использовать полученные в результате проводимых траекторных измерений избыточные данные (временные и пространственные) и осуществлять их совместную обработку. Апробацию работы адаптивного алгоритма проводили методом имитационного моделирования [9].

Вначале проверяли качество работы адаптивного алгоритма при радиолокационном контроле на типовой траектории ЛА. Затем полученные ранее результаты качества работы адаптивного алгоритма сравнивали с результатами работы алгоритма неадаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений.



Модель петли Нестерова
Nesterov loop model (loop-the-loop)

Проверку качества работы неадаптивного алгоритма осуществляла группа экспертов, имеющих большой практический опыт работы на испытательных полигонах. При этом степени сглаживающего полинома назначались решением эксперта на основании имеющегося опыта. Для апробации работы адаптивного алгоритма использовали типовую траекторию ЛА – петлю Нестерова (рисунок).

При моделировании по измеренным данным приняты следующие условия:

– для первого прямолинейного участка (период времени $t = 1...25$ с) полета ЛА зафиксированы вторичные координаты $Y(t) = 1000$ м, $X(t) = 10\,000$ м, а координата $Z(t)$ во времени изменялась по закону $Z(t) = 210t$;

– для периода времени $t = 26...75$ с зафиксирована вторичная координата $X(t) = 10\,000$ м, а координаты $Z(t)$ и $Y(t)$ рассчитаны с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} Z(t) &= Z_0 + R_p \sin \theta, \quad R_p = 1500, \\ Y(t) &= Y_0 + R_p \cos(180 - \theta), \\ Z_0 &= Z(25), \quad Y_0 = 1000 + R_p, \quad \theta = 7,2(t - 25); \end{aligned}$$

– для периода времени $t = 76...100$ с координаты $X(t)$ и $Y(t)$ аналогичны по значению, как и для первого прямолинейного участка, а координата $Z(t)$ определена по закону $Z(t) = 210(t - 25)$.

В рассматриваемом случае для всех выражений $Y(t)$, $X(t)$, $Z(t)$ – истинные значения моделируемых вторичных координат; t – текущий момент времени; R_p – радиус-вектор (петли Нестерова); θ – угол между осью OY и радиусом вектора R_p . Частота дискретизации составляет 1 Гц, количество точек на интервале измерения равно 100. При моделировании количество точек на интервалах локально скользящего сглаживания равно – 9 и 25.

Результаты и их обсуждение. Обработаны данные измерений от двух радиолокационных станций (РЛС). Координаты РЛС относительно старта и среднеквадратические ошибки (СКО) измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения СКО измерений и координаты местоположения РЛС относительно начала отсчета

Table 1

Location coordinates of external trajectory measuring instruments relative to the zero-reference datum and root-mean-square measurement errors

РЛС	СКО измерений			Координаты РЛС относительно старта		
	R_m	α'	β'	Y_m	X_m	Z_m
1	40	7	7	0	0	0
2	40	7	7	0	0	8000

Время корреляции ошибок измерений составляет $\tau_k = 3$ с, процесс автокорреляции моделировался по закону $\exp(-\varepsilon_\xi | \tau_k |)$ [2]. Полученные ошибки измерений по причине их происхождения можно разделить на две составляющие: быстрофлуктуирующие и медленнофлуктуирующие. Быстрофлуктуирующие ошибки при $\tau_k = 3$ с, составляющие половину СКО измерений, появлялись из-за шумов атмосферного происхождения, шумов работы систем приемного устройства и т. п. Вторая половина СКО измерений – это медленнофлуктуирующие ошибки. Причины их появления следующие: сезонные и суточные изменения условий распространения радиоволн, ошибки юстировки и калибровки антенн, входящих в состав РЛС, отклонение параметров приемо-передающей аппаратуры относительно паспортных данных [10–12].

Оценку работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома [8] проводили за счет локально скользящего сглаживания на интервале измерений. При этом для каждой измеряемой первичной координаты определяли средний выигрыш в точности. В табл. 2 представлены результаты работы алгоритма неадаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений, полученные группой экспертов, в табл. 3 приведены результаты работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений.

Таблица 2

Результаты работы алгоритма неадаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений

Table 2

Results of the non-adaptive nonlinear optimal smoothing algorithm of multi-parameter measurement data

Число точек на интервал сглаживания	Степень полинома	Выигрыш в точности						W_{Σ}^*
		РЛС 1			РЛС 2			
		Дальность W_R	Азимут W_{α}	Угол места W_{β}	Дальность W_R	Азимут W_{α}	Дальность W_{β}	
9	1	1,55	0,37	0,28	0,88	0,34	0,49	0,65
	2	2,46	1,15	1,22	1,13	1,44	1,92	1,55
	3	2,47	1,15	1,22	1,13	1,44	1,42	1,55
	4	2,43	1,12	1,16	1,11	1,38	1,84	1,51
25	1	0,31	0,05	0,04	0,20	0,05	0,08	0,12
	2	1,79	0,75	0,40	0,81	0,89	0,70	0,89
	3	2,30	0,82	0,40	1,05	0,94	0,69	1,03
	4	2,51	1,18	1,10	1,14	1,53	1,78	1,54

* Суммарный средний выигрыш в точности по всем первичным координатам [9].

Таблица 3

Результаты работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений

Table 3

Results of the adaptive nonlinear optimal smoothing algorithm of multi-parameter measurement data

Число точек на интервал сглаживания	Выигрыш в точности						W_{Σ}
	РЛС 1			РЛС 2			
	Дальность W_R	Азимут W_{α}	Угол места W_{β}	Дальность W_R	Азимут W_{α}	Дальность W_{β}	
9	2,34	1,19	1,28	1,08	1,40	2,03	1,55
25	2,49	1,18	1,29	1,13	1,54	2,09	1,62

Заключение. Анализ качества работы адаптивного и неадаптивного алгоритмов позволяет сделать следующие выводы.

При количестве точек $n = 9$ на интервале локально скользящего сглаживания адаптивный алгоритм при степени сглаживающего полинома $m = 2$ и 3 не уступает неадаптивному алгоритму, а при степени сглаживающего полинома $m = 1$ и 4 превосходит его. При количестве точек $n = 25$ на интервале локально скользящего сглаживания адаптивный алгоритм значительно превосходит неадаптивный алгоритм. Неадаптивный алгоритм при заниженных или завышенных степенях сглаживающего полинома имеет проигрыш в точности по первичным координатам, а при применении адаптивного алгоритма во всех случаях получен выигрыш в точности при определении первичных координат.

Литература

1. Огороднийчук Н. Д. Обработка траекторной информации. Ч. 1. Киев: КВВАИУ, 1981. 141 с.
2. Огороднийчук Н. Д. Обработка траекторной информации. Ч. 2. Киев: КВВАИУ, 1986. 224 с.

3. **Еналеев С. Ф.** Траекторные измерения: практическое пособие. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 124 с.
4. **Мотильов К. І., Михайлов М. В., Щербов І. Л., Пасльон В. В.** Методи обробки даних вимірів, які володіють просторовою та часовою надмірністю // Системні технології = System technologies. 2006. Т. 5. № 46. С. 95–100.
5. **Мильштейн А. В., Паслен В. В.** Метод нелинейного сглаживания в обработке данных траекторных измерений // Збірник наукових праць ДонІЗТ. Вип. 28. Донецьк: ДонІЗТ, 2011. С. 93–101.
6. **Мильштейн А. В., Паслен В. В.** Построение алгоритма оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. 2012. № 22 (200). С. 109–114. EDN SXIMXP.
7. **Щербов І. Л., Пасльон В. В.** Обработка данных траекторного контроля с использованием ортогональных базисных функций // Вестник Академии гражданской защиты. 2021. № 1 (25). С. 48–53. EDN НННТРК.
8. **Щербов І. Л.** Исследование алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений // Информатика и кибернетика. 2020. № 4 (22). С. 5–11. EDN SDZZDJ.
9. **Щербов І. Л.** Информационные технологии математического моделирования обработки данных траекторного контроля // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2021. № 1. С. 71–77. EDN WNGGTU.
10. **Жданиук Б. Ф.** Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978. 384 с.
11. **Светозаров В. В.** Основы статистической обработки результатов измерений. 2-е изд., перераб. М.: МИФИ, 2005. 39 с.
12. **Савчук В. П.** Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. Ч. 1. Одесса: ОНПУ, 2002. 54 с.

Статья поступила в редакцию 27.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.02.2023 г.; принята к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторе

Щербов Игорь Леонидович – проректор по социальным и хозяйственным вопросам Донецкого национального технического университета (Россия, 283001, ДНР, г. Донецк, ул. Артема, 58), scherbov@yandex.ru

References

1. Ogorodniychuk N. D. *Trajectory information processing*. Part 1. Kyiv, KVVAIU Publ., 1981. 141 p. (In Russian).
2. Ogorodniychuk N. D. *Trajectory information processing*. Part 2. Kyiv, KVVAIU Publ., 1986. 224 p. (In Russian).
3. Enaleev S. F. *Trajectory measurements, practical guide*. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2021. 124 p. (In Russian).
4. Motylov K. I., Mikhailov M. V., Shcherbov I. L., Paslon V. V. Measurement data processing methods that have spatial and temporal redundancy. *Systemni tekhnologii = System Technologies*, 2006, vol. 5, no. 46, pp. 95–100. (In Ukrainian).
5. Mil'shtein A. V., Paslen V. V. Method of nonlinear smoothing in data processing of trajectory measurements. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT = Scientific Papers of Donetsk Institute of Rail Transport*. Iss. 28. Donetsk, Donetsk Institute of Rail Transport Publ., 2011, pp. 93–101. (In Russian).
6. Milshtein A. V., Paslon V. V. Construction [of] the optimal smoothing algorithm of polyvalent data of measurements. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Obchislyval'na tekhnika ta avtomatizatsiya = Collection of Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: Computer Engineering and Automation*, 2012, no. 22 (200), pp. 109–114. (In Russian). EDN SXIMXP.
7. Shcherbov I. L., Paslyon V. V. Processing of trajectory control data using orthogonal basis functions. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity = Civil Defence Academy Journal*, 2021, no. 1 (25), pp. 48–53. (In Russian).

8. Shcherbov I. L. Investigation of the algorithm for adaptive nonlinear optimal smoothing of multiparameter measurement data. *Informatika i kibernetika = Informatics and Cybernetics*, 2020, no. 4 (22), pp. 5–11.

(In Russian). EDN SDZZDJ.

9. Shcherbov I. L. Information technologies for mathematical modeling of trajectory control data processing. *Vestnik Donetskogo natsional'nogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*, 2021, no. 1, pp. 71–77. (In Russian). EDN WNGGTY.

10. Zhdanyuk B. F. *Fundamentals of statistical processing of trajectory measurements*. Moscow, Sov. radio Publ., 1978. 384 p. (In Russian).

11. Svetozarov V. V. *Fundamentals of statistical processing of measurement results*. 2nd ed., rev. Moscow, MEPhI Publ., 2005. 39 p. (In Russian).

12. Savchuk V. P. *Processing of measurement results. Physical laboratory*. Part 1. Odessa, ONPU Publ., 2002. 54 p. (In Russian).

The article was submitted 27.01.2023; approved after reviewing 27.02.2023;
accepted for publication 30.03.2023.

Information about the author

Igor L. Shcherbov – Vice-Rector for Social and Economic Affairs, Donetsk National Technical University (Russia, 283001, Donetsk People's Republic, Donetsk, Artem st., 58),
scherbov@yandex.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2007 по 2022 гг. доступны на сайтах
Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия
высших учебных заведений. Электроника»: <http://ivuz-e.ru>

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF REPORTS

Краткое сообщение

УДК 621.3.049.776.43:544.541:004.946ТСАД

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-3-385-390

EDN: JBESTY

Моделирование средствами TCAD воздействия тяжелых заряженных частиц на *n*-МОП-структуру в составе ячейки памяти

В. П. Смирнова, Т. Ю. Крупкина

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

smirnova-vera123@yandex.ru

Аннотация. При проектировании радиационно стойких микросхем, в частности микросхем памяти, возникает необходимость учитывать распространение токов, вызванных тяжелой заряженной частицей (ТЗЧ), попавшей в устройство. При уменьшении топологических норм и увеличении плотности упаковки повышается вероятность множественных сбоев, причина которых – диффузионные токи. Анализ данных эффектов представляет собой сложную вычислительную задачу, трудоемкость решения которой возрастает при уменьшении топологических размеров элементов. В работе предложен подход, основанный на использовании возможностей TCAD для моделирования конструктивных областей наноразмерных ИС. Представлена модель в цилиндрических координатах для приборно-технологического моделирования генерации и сбора заряда после воздействия ТЗЧ на МОП-структуру. Описанный подход позволяет оперативно оценить значения диффузионного тока, вызванного ТЗЧ и проходящего через область определенной площади. При применении данного подхода к ячейке памяти можно определить, на каком расстоянии от точки падения ТЗЧ диффузионный ток от частиц превышает граничный ток, при котором происходит радиационно-индуцированный сбой. Это позволяет оценить вероятность возникновения множественных сбоев и скорректировать топологию с учетом данных факторов, а также провести аналитическую оценку сечения сбоя до производства и испытаний микросхемы.

Ключевые слова: КМОП ИС, тяжелая заряженная частица, радиационная стойкость, ячейка памяти, TCAD

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-37-90005).

Для цитирования: Смирнова В. П., Крупкина Т. Ю. Моделирование средствами TCAD воздействия тяжелых заряженных частиц на *n*-МОП-структуру в составе ячейки памяти // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 385–390. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-385-390>. – EDN: JBESTY.

Brief report

TCAD simulation of a heavy charged particle impact on a n -MOS structure as a part of a memory cell

V. P. Smirnova, T. Yu. Krupkina

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

smirnova-vera123@yandex.ru

Abstract. When designing radiation hardened integrated circuits, especially memory chips, it becomes necessary to consider the propagation of currents caused by a heavy charged particle that has stroked the device. A decrease in technological norms and an increase in packing density enhance the likelihood of multiple cells upset caused by diffusion currents. The analysis of these effects is a complex computational problem, the laboriousness of which increases with a decrease in elements feature size. In this work, an approach is presented based on the use of TCAD capabilities for simulating the structural regions of nanoscale ICs. A TCAD model in cylindrical coordinates for simulation of charge generation and collection after the impact of a heavy charged particle on a MOS structure has been proposed. The described technique allows quick estimation of the values of the diffusion current caused by heavy charged particle passing through an $n+$ region of a certain area. Taking this approach to a memory cell it is possible to determine at what distance from the point of the heavy charged radiation particle impact the diffusion current exceeds the boundary current at which the radiation-induced failure in a memory cell occurs. This allows the estimation of multiple cell upsets probability and the adjustment of layout for these factors, as well as an analytical assessment of the upset cross-section before the production and testing of the integrated circuit.

Keywords: CMOS IC, heavy charged particle, radiation hardening, TCAD, memory cell

Funding: the work has been supported by Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-37-90005).

For citation: Smirnova V. P., Krupkina T. Yu. TCAD simulation of a heavy charged particle impact on a n -MOS structure as a part of a memory cell. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 385–390. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-385-390>. – EDN: JBECTY.

Существующие на сегодняшний день методы моделирования воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) на полупроводниковые приборы различаются по сложности и доступности для инженера и, как правило, требуют много времени на построение модели и на вычисления [1–5]. Предлагаемая в настоящей работе модель проста в построении и позволяет быстро провести оценку радиуса распространения диффузионного тока частицы, необходимую для проектирования топологии микросхем повышенной радиационной стойкости [6]. Рассматриваемый подход основан на использовании численных методов приборно-технологического моделирования, что позволяет повысить точность оценки по сравнению с аналитическим подходом. Тенденция к прецизионному многоступенчатому формированию профилей распределения примеси, уменьшение топологических размеров приводят к необходимости повышения роли информации о технологическом процессе формирования слоев. Точность описания моделируемой структуры дополнительно может быть повышена за счет калибровки параметров модели по экспериментальным данным.

В полупроводниковых приборах самым чувствительным к попаданию ТЗЧ является обратносмещенный p – n -переход [7]. В ячейке памяти, состоящей из двух инверторов с обратной связью, наиболее уязвимы к попаданию ТЗЧ стоковые p – n -переходы закрытых транзисторов [8]. В области попадания ТЗЧ часть зарядов собирается за счет дрейфа и диффузии [9]. Дрейфовая

компонента тока локализована в точке падения ТЗЧ, а волна диффузионного тока начинает распространяться дальше по подложке [10–12]. Если ТЗЧ попадает в стоковые p – n -переходы закрытых транзисторов, то происходит сбой пораженной ячейки, а возникший диффузионный ток может привести к сбою одной или нескольких соседних ячеек [13–15]. Наличие или отсутствие сбоя в расположенных в области распространения диффузионного тока ячейках определяется значением диффузионного тока, которое, в свою очередь, зависит от расстояния до точки падения ТЗЧ.

Ячейка переключается, когда ток от ТЗЧ превышает граничный ток, который можно определить с помощью DC-моделирования. Граничным током будет значение максимального тока помехи, который может выдержать ячейка не переключаясь. Уязвимая площадь ячейки в рассматриваемом случае равна площади стока n -канального МОП-транзистора. Значения граничного тока и уязвимой площади ячейки S необходимы для обработки и применения результатов моделирования.

Воздействие ТЗЧ, при котором ее трек перпендикулярен поверхности структуры, имеет цилиндрическую симметрию [16]. Это позволяет свести трехмерную модель воздействия ТЗЧ на МОП-структуру к двумерной модели, в результате чего существенно сократится время моделирования. Дополнительно сократить время моделирования можно, используя среднее значение потери энергии вдоль трека частицы, что внесет незначительную погрешность в результаты, однако кратно ускорит процесс.

Для исследования воздействия ТЗЧ на n -МОП-структуру в среде приборно-технологического моделирования TCAD Sentaurus использовано несколько моделей в цилиндрических координатах, представляющих собой пять концентрических n^+ -областей минимальной ширины, вложенных одна в другую, с контактами к этим областям. В базовых вариантах модели n^+ -области разделены либо областями поликремния минимальной ширины (0,1 мкм) для представления многопальцевого транзистора, либо областями щелевой изоляции для моделирования отдельно стоящих транзисторов. По краю поверхности расположен p^+ -контакт к p -подложке. Полученные результаты моделирования показали, что для проектных норм 90 нм при попадании ТЗЧ в активную область D1 заряд, собираемый кольцевыми n^+ -областями, зависит только от расстояния области до точки падения частицы и площади кольца и не зависит от типа разделения n^+ -областей (поликремнием или STI-областями) в пределах погрешности вычислений. Убедиться в этом можно, заменив область D2 и прилегающие затворы на STI-область соответствующего размера. На рис. 1 представлена модель с поликремниевыми затворами.

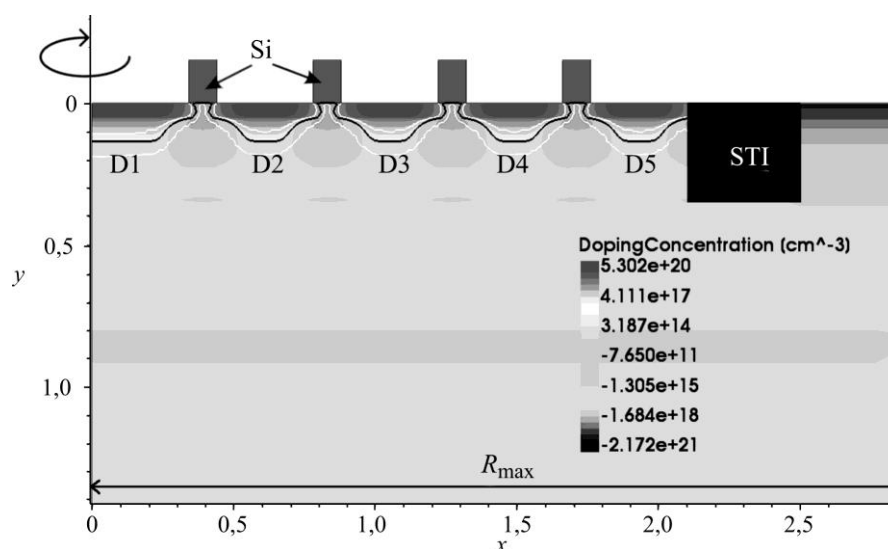


Рис. 1. Двумерная TCAD-модель в цилиндрических координатах для расчета временных зависимостей токов и собранных зарядов, возникающих при воздействии ТЗЧ на n -МОП-структуру

Fig. 1. The 2D TCAD model in cylindrical coordinates for calculating the time dependences of currents and collected charges from a heavy charged particle in an n -MOS structure

Результатом моделирования является зависимость тока от времени для каждой кольцевой n^+ -области (D1–D5). Ток в области D1 включает в себя дрейфовую и диффузионную компоненты, ток в областях D2–D5 только диффузионный. Для применения результатов моделирования в цилиндрических координатах к реальному фрагменту ИС необходимо рассчитать плотность тока, разделив полученные значения тока на площади колец D1–D5. Далее плотность тока умножается на площадь чувствительной области исследуемой ячейки, т. е. на площадь стока n -канального транзистора. Результатом этих действий является временная зависимость тока, проходящего через уязвимую площадь, которая находится на разных расстояниях от точки падения частицы. Это позволяет сравнить значения тока со значениями граничного тока. Если ток превышает граничный ток, то происходит сбой. Таким образом можно определить радиус поражения от частицы. На рис. 2 приведена зависимость тока от времени для 6-транзисторной ячейки памяти, выполненной по технологии 90 нм, граничный ток для которой составляет 11,86 мкА, уязвимая площадь равна $0,065 \text{ мкм}^2$. Из рисунка видно, что ток, протекающий через сток, находящийся на расстоянии, соответствующем области D2 ($0,6\text{--}0,94 \text{ мкм}$), превышает граничный ток. Из этого следует, что в ячейке, сток закрытого n -канального транзистора которой попадает в этот радиус, произойдет сбой. Полученный радиус позволяет оценить устойчивость массива ячеек памяти к множественным сбоям и использовать его в аналитической оценке сечения сбоя.

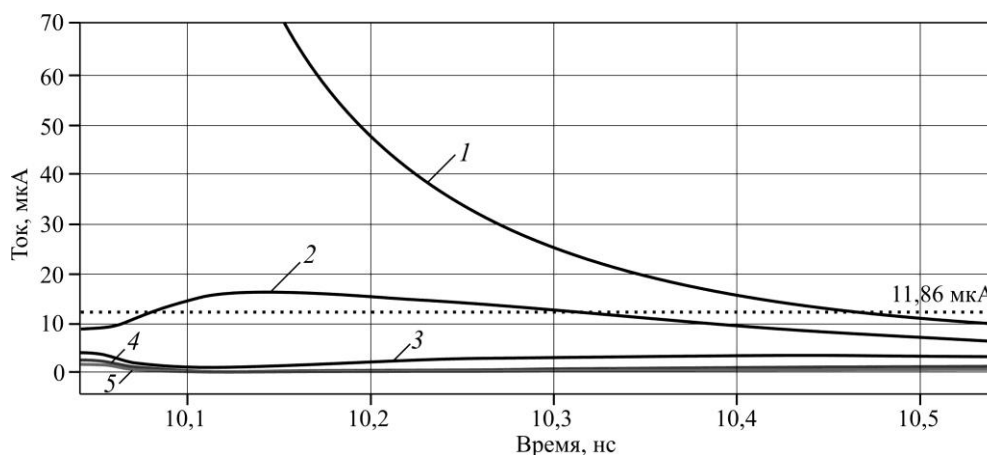


Рис. 2. Зависимость тока, протекающего через чувствительную область площадью $S = 0,065 \text{ мкм}^2$, от времени: \cdots – граничный ток; 1 – D1; 2 – D2; 3 – D3; 4 – D4; 5 – D5

Fig. 2. Dependence of the current flowing through the sensitive area $S = 0.065 \text{ }\mu\text{m}^2$ on time: \cdots – boundary current; 1 – D1; 2 – D2; 3 – D3; 4 – D4; 5 – D5

Аналогичным методом можно определить расстояние, на которое следует разнести дублируемые элементы в топологии, чтобы избежать одновременного их сбоя. С этой целью при расчетах в качестве уязвимой площади требуется использовать уязвимую площадь интересующего элемента и соответствующий ему граничный ток.

В приведенных моделях рассмотрены только n -канальные транзисторы и попадание ТЗЧ в активную область, не учтено наличие кармана в ячейке памяти. Однако ТЗЧ может попасть в область изоляции. В таком случае отсутствует дрейфовая компонента тока и весь ток становится диффузионным. Описанный подход к моделированию и анализу результатов можно использовать для всех областей ячейки, т. е. рассматривать попадание частицы в области изоляции, кармана, в p -канальный транзистор, а также учитывать переход карман – подложка. Информация о технологическом процессе, на основе которой формируется исходная модель, остается неизменной, варьируются только размеры областей и порядок их размещения в моделируемой структуре. Каждый новый рассмотренный случай повышает точность оценки радиуса сбоя.

Представленная модель в цилиндрических координатах для приборно-технологического моделирования на примере воздействия ТЗЧ на n -МОП-структуру и предложенный подход к

обработке результатов дают возможность достаточно быстро определять диффузионные токи, проходящие через области, расположенные на расстоянии от точки падения ТЗЧ. Полученные результаты позволяют проводить аналитическую оценку сечения сбоя для заданных проектных норм и определенной конфигурации ячейки до начала производства и испытаний микросхемы, а также учитывать эти данные при проектировании ее топологии.

Литература

1. Схемотехническое моделирование одиночных эффектов при воздействии тяжелых заряженных частиц в КМОП СБИС с суб-100-нм проектными нормами / *А. А. Смолин, А. Б. Борудина, А. В. Уланова и др.* // Изв. вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 5. С. 447–459. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-5-447-459>
2. *Тельпухов Д. В., Деменева А. И., Надоленко В. В.* Исследование и разработка автоматизированных средств моделирования случайных сбоев в современных комбинационных КМОП ИМС // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2019. № 4 (206). С. 207–219. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-4-207-219>
3. Anthology of the development of radiation transport tools as applied to single event effects / *R. A. Reed, R. A. Weller, A. Akkerman et al.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. Vol. 60. Iss. 3. P. 1876–1911. <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2262101>
4. An overview of the modeling and simulation of the single event transients at the circuit level / *M. Andjelkovic, A. Ilic, Z. Stamenkovic et al.* // 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL). Niš: IEEE, 2017. P. 35–44. <https://doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190065>
5. *Балбеков А. О.* Методы и средства повышения устойчивости к многократным сбоям ячеек статической памяти и комбинационных элементов микросхем с проектными нормами уровня 65 нм: дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 102 с.
6. Single event upsets in a 130 nm hardened latch design due to charge sharing / *O. A. Amusan, A. L. Stenberg, A. F. Witulski et al.* // 2007 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 45th Annual. Phoenix, AZ: IEEE, 2007. P. 306–311. <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2007.369908>
7. *Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.* Космическая электроника: в 2 кн. М.: Техносфера, 2015. Кн. 2. С. 700–1183.
8. Design and evaluation of radiation-hardened standard cell flip-flops / *O. Schrape, M. Andjelković, A. Breitenreiter et al.* // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2021. Vol. 68. No. 11. P. 4796–4809. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2021.3109080>
9. *Baumann R. C.* Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2005. Vol. 5. Iss. 3. P. 305–316. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2005.853449>
10. *Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чумаков А. И.* Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994. 164 с.
11. *Зебрев Г. И.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции // Кафедра микро- и наноэлектроники НИЯУ МИФИ [Электронный ресурс]. 2010. URL: http://www.нано-е.рф/uploads/files/Zebrev_Radiacionnye_effekty.pdf (дата обращения: 27.03.2023).
12. *Kirkpatrick S.* Modeling diffusion and collection of charge from ionizing radiation in silicon devices // IEEE Transactions on Electron Devices. 1979. Vol. 26. Iss. 11. P. 1742–1753. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1979.19680>
13. *Gaspard N. J. (III)* Single-event upset technology scaling trends of unhardened and hardened flip-flops in bulk CMOS: diss. for the PhD (Electr. Eng.). Nashville, TN: Univ. of Vanderbilt, 2017. IX, 79 p.
14. Multiple cell upset classification in commercial SRAMs / *G. Tsiligiannis, L. Dillo, A. Bosio et al.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2014. Vol. 61. Iss. 4. P. 1747–1754. <https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2313742>
15. Mechanisms of multiple cell upsets in memory / *A. I. Chumakov, A. V. Sogoyan, A. B. Boruzdina et al.* // Сборник избранных трудов на английском языке VII Всероссийской научно-технической конференции МЭС-2016 = Selected Articles of the VII All-Russia Science and Technology Conference MES-2016. М.: ИППИ РАН, 2017. Ч. 4. С. 49–54.
16. *Зольников В. К., Потанов И. П., Танеро К. И.* Моделирование сбоя заряда при воздействии тяжелых заряженных частиц в КМОП элементах микросхем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2010. № 1. С. 275–278. EDN MVWVTJ.

Краткое сообщение поступило в редакцию 18.10.2022 г.; одобрено после рецензирования 02.02.2023 г.;
принято к публикации 30.03.2023 г.

Информация об авторах

Смирнова Вера Петровна – инженер Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), smirnova-vera123@yandex.ru

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

References

1. Smolin A. A., Boruzdina A. B., Ulanova A. V., Yanenko A. V., Sogoyan A. V., Nikiforov A. Y., Telets V. A., Chumakov A. I., Shelepin N. A. Circuit engineering modeling of single event effects under impact of heavy-charged particles in sub-100 nm CMOS ICs. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 447–459. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-5-447-459>
2. Telpukhov D. V., Demeneva A. I., Nadolenko V. V. Study and design of automated tools for simulation of soft errors in modern combinational CMOS IC. *Izv. YuFU. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2019, no. 4 (206), pp. 207–219. (In Russian). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-4-207-219>
3. Reed R. A., Weller R. A., Akkerman A., Barak J., Culpepper W., Duzellier S., Foster C., Gaillardin M., Hubert G., Jordan T. et al. Anthology of the development of radiation transport tools as applied to single event effects. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, vol. 60, iss. 3, pp. 1876–1911. <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2262101>
4. Andjelkovic M., Ilic A., Stamenkovic Z., Krstic M., Kraemer R. An overview of the modeling and simulation of the single event transients at the circuit level. *2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL)*. Niš, IEEE, 2017, pp. 35–44. <https://doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190065>
5. Balbekov A. O. *Methods and tools of increasing the resistance to multiple failures of static memory cells and combinational elements of microcircuits with design standards of the level of 65 nm*, diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Moscow, 2022. 102 p. (In Russian).
6. Amusan O. A., Stemberg A. L., Witulski A. F., Bhuva B. L., Black J. D., Baze M. P., Massengill L. W. Single event upsets in a 130 nm hardened latch design due to charge sharing. *2007 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 45th Annual*. Phoenix, AZ, IEEE, 2007, pp. 306–311. <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2007.369908>
7. Belous A. I., Solodukha V. A., Shvedov S. V. *Space electronics*, in 2 books. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2015, book 2, pp. 700–1183. (In Russian).
8. Schrape O., Andjelković M., Breitenreiter A., Zeidler S., Balashov A., Krstić M. Design and evaluation of radiation-hardened standard cell flip-flops. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2021, vol. 68, no. 11, pp. 4796–4809. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2021.3109080>
9. Baumann R. C. Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2005, vol. 5, iss. 3, pp. 305–316. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2005.853449>
10. Nikiforov A. Yu., Telets V. A., Chumakov A. I. *Radiation effects in CMOS IS*. Moscow, Radio i svyaz', 1994. 164 p. (In Russian).
11. Zebrev G. I. Radiation effects in silicon integrated circuits with a high degree of integration. *Kafedra mikro- i nanoelektroniki NIYaU MIFI*. 2010. (In Russian). Available at: http://www.xn----7sbq3abg.xn--p1ai/uploads/files/Zebrev_Radiacionnyye_effekty.pdf (accessed: 27.03.2023).
12. Kirkpatrick S. Modeling diffusion and collection of charge from ionizing radiation in silicon devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, vol. 26, iss. 11, pp. 1742–1753. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1979.19680>
13. Gaspard N. J. (III) *Single-event upset technology scaling trends of unhardened and hardened flip-flops in bulk CMOS*, diss. for the PhD (Electr. Eng.). Nashville, TN, Univ. of Vanderbilt, 2017. ix, 79 p.
14. Tsiligiannis G., Dilillo L., Bosio A., Girard P., Pravossoudovitch S., Todri A., Virazel A., Puchner H. et al. Multiple cell upset classification in commercial SRAMs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, vol. 61, iss. 4, pp. 1747–1754. <https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2313742>
15. Chumakov A. I., Sogoyan A. V., Boruzdina A. B., Smolin A. A., Pechenkin A. A. Mechanisms of multiple cell upsets in memory. *Sbornik izbrannykh trudov na angliyskom yazyke VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii MES-2016 = Selected Articles of the VII All-Russia Science and Technology Conference MES-2016*. Moscow, IPPM RAS, 2017, part 4, pp. 49–54.
16. Zolnikov V. K., Potapov I. P., Tapero K. I. Modeling of the charge gathering from the heavy charged particles influence in CMOS integrated circuit. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2010, no. 1, pp. 275–278. EDN MVVVTJ.

The brief reports was submitted 18.10.2022; approved after reviewing 02.02.2023; accepted for publication 30.03.2023.

Information about the authors

Vera P. Smirnova – Engineer of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), smirnova-vera123@yandex.ru

Tatiana Yu. Krupkina – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), krupkina@miee.ru

ЮБИЛЕИ

Красникову Геннадию Яковлевичу – 65 лет



30 апреля 2023 г. исполнилось 65 лет **Геннадию Яковлевичу Красникову**, академику РАН, президенту РАН, генеральному директору АО «НИИ молекулярной электроники», ученому в области физики полупроводников, диэлектриков, гетероструктур и полупроводниковых приборов.

В 1981 г. Геннадий Яковлевич с отличием окончил физико-технический факультет МИЭТ и пришел на работу в НИИ молекулярной электроники, в 1991 г. назначен директором НИИ молекулярной электроники с опытным заводом «Микрон». С 2016 г. Г. Я. Красников – генеральный директор АО «НИИ молекулярной электроники».

Основные направления научной деятельности Г. Я. Красникова – исследования в области физики транзисторных структур. Заслугой ученого является обоснование конструктивно-технологических особенностей транзисторных структур при переходе в субмикронные размеры элементов. Предложенные Г. Я. Красниковым принципы формирования кремниевых транзисторных структур были впервые использованы для создания интегральных схем на арсениде галлия. Г. Я. Красников внес существенный вклад в исследования радиационно стойкой электронной компонентной базы для бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Значительное повышение радиационной стойкости интегральных схем достигнуто применением специальных технологий кремний на изоляторе и методов проектирования с использованием технологий объемного кремния. В настоящее время Геннадий Яковлевич участвует в исследованиях молекулярного транзистора, работа которого основана на взаимодействии двух физических механизмов, свойст-

венных открытым квантовым системам, действующим согласованно.

Научные результаты Г. Я. Красникова легли в основу создания при его непосредственном руководстве современного уникального комплекса по разработке и промышленному производству интегральных микросхем уровня 180 – 90 – 65 нм, на базе которых реализованы стратегические государственные проекты в области телекоммуникации и связи, транспорта, национальной платежной банковской системы, выпуска государственных электронных документов.

Геннадий Яковлевич Красников – автор и соавтор более 460 научных работ в отечественных и зарубежных рецензируемых изданиях, 8 научных монографий и более 50 авторских свидетельств и патентов.

Академик Г. Я. Красников – руководитель приоритетного технологического направления «Электронные технологии» РФ, председатель научных советов РАН «Квантовые технологии» и «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее соз-

дания», член Совета директоров Глобального альянса производителей полупроводников (Global Semiconductor Alliance), заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники МФТИ, заведующий кафедрой субмикронных технологий СБИС МИЭТ, главный редактор журналов «Микроэлектроника», «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника», член редакционных коллегий журналов «Известия высших учебных заведений. Электроника», «Электроника: наука, технология, бизнес».

Руководство РФ высоко ценит вклад Г. Я. Красникова в развитие отечественной микроэлектроники: он лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, трех премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники, награжден орденами «За заслуги перед Отечеством» III степени, «За заслуги перед Отечеством» IV степени, орденом Александра Невского, орденом Почета, орденом Дружбы и медалями, в том числе медалью ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий».

Поздравляем Геннадия Яковлевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, благополучия, новых творческих свершений и выражаем глубокую признательность за значительный вклад в развитие российской науки!

Редколлегия

КОНФЕРЕНЦИИ

Об итогах XXX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2023» с международным участием

Конференция «Микроэлектроника и информатика» проводится в МИЭТ ежегодно с 1994 г., меняя свой статус: «межвузовская», «всероссийская», «с международным участием». За 30 лет на конференции было заслушано и опубликовано более 8 тыс. работ студентов, аспирантов и молодых ученых из Азербайджана, Армении, Белоруссии, Вьетнама, Италии, Казахстана, Мьянмы, России, Узбекистана и Украины.

С 20 по 21 апреля 2023 г. в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» проходила XXX юбилейная Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2023» с международным участием.

В программу конференции включены 309 докладов из МИЭТ, НИЯУ МИФИ, МАИ, МГТУ «Станкин», Первого МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России, МАДИ, МИСиС, ФГБОУ ВО «МГТУ Станкин», РУДН, ФТИАН им. К. А. Валиева РАН, ИФХЭ им. А. Н. Фрумкина РАН, ИНМЭ РАН, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, АНО ВО «Российский новый университет», АО «НИИМЭ», АО «Микрон», АО «Ангстрем», АО НПЦ «ЭЛВИС», НПП «ОПТЭКС», ООО «Молекулярные технологии и новые материалы», НПК «Технологический центр», АО «Московский завод «Сапфир», ООО «НПО «Биомедтех», ООО «НМ-Тех», ООО «Гринсайт», АО «ЗНТЦ» (Москва), ХГУ им. Н. Ф. Катанова (Абакан), ИАПУ ДВО РАН (Владивосток), ВлГУ (Владимир), ВГУ (Воронеж), МФТИ (Долгопрудный), Донецкого государственного технического университета (Донецк), Уральского института ГПС МЧС (Екатеринбург), Марийского государственного университета (Йошкар-Ола), ОмГТУ (Омск), ЮФУ (Ростов-на-Дону), РГРТУ (Рязань), АО «РКЦ «Прогресс» (Самара),

Луганского национального университета им. Тараса Шевченко (Луганск), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГУ (Санкт-Петербург), ИНЭП ЮФУ (Таганрог), ТвГУ (Тверь) НИ ТГУ, ТУСУР (Томск), АО «НПП «Исток» им. Шокина (Фрязино), ИПЛИТ РАН (Шатура), ЯрГУ им. П. Г. Демидова (Ярославль), КазНУ им. аль-Фараби (Казахстан, Алматы), Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилёва (Республика Казахстан, Астана), ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (Белоруссия, Минск) и др. В работе конференции активное участие принимали студенты и аспиранты МИЭТ из Мьянмы.

К началу работы конференции изданы программа и сборник тезисов докладов, отражающих результаты теоретических и практических исследований ученых.

На конференции работали 11 секций: *Материалы микро- и наноэлектроники; Проектирование ИС и электронных компонентов; Оборудование и технология полупроводниковых приборов и ИС; Сенсоры и микромеханика; Информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства; Радиотехника, системы и устройства связи и телекоммуникаций; Информационные системы и технологии в цифровой экономике; Информационная безопасность; Биомедицинская электроника; Экологические проблемы электроники и окружающей среды; Менеджмент, маркетинг в электронике и информатике.*

На конференции выступили 242 докладчика, в том числе 168 студентов, 52 аспиранта.

Пленарное заседание конференции открыл президент МИЭТ акад. РАН, д. т. н., проф. Ю. А. Чаплыгин. Он кратко изложил историю конференции и отметил заслуги сотрудников МИЭТ, принимавших участие в ее работе на протяжении более 20 лет в качестве руководителей и ученых секретарей секций. Это д. физ.-мат. н., проф. В. Д. Вернер (1932–2016), д. т. н., проф. В. А. Бархоткин (1938–2019), д. физ.-мат. н., проф. А. С. Поспелов (1945–2010), д. т. н., проф. В. В. Бариннов (1949–2014), д. т. н., проф. Г. Г. Казённов (1935–2017), д. физ.-мат. н., проф. С. А. Терещенко (1953–2021), начальник Издательско-полиграфического комплекса МИЭТ канд. т. н., доц. А. А. Руденко (1945–2016), директор Института биомедицинских систем д. физ.-мат. н., проф. С. В. Селищев, д. т. н., доц. Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина М. П. Кочетков, д. физ.-мат. н., проф. Института интегральной электроники В. К. Неволлин, директор Института нано- и микросистемной техники д. т. н., проф. С. П. Тимошенков, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий д. т. н., проф. Л. Г. Гагарина, проректор по научной работе, директор Института перспективных материалов и технологий д. т. н., проф. С. А. Гаврилов, заместитель директора НИИ электронной техники, заместитель председателя Оргкомитета конференции (с 1996 по 2022 г.) канд. т. н., доц. В. Ю. Пустовит, начальник Отдела научно-технической информации, секретарь Оргкомитета конференции В. П. Харач и др.

На пленарном заседании выступили главный научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева РАН акад. РАН, д. физ.-мат. н., проф. А. А. Горбачевич с докладом «Квантовые технологии и современная микроэлектроника» и директор НПК «Технологический центр» чл.-корр. РАН, д. физ.-мат. н., проф. В. В. Светухин с докладом «Кремниевая интегральная фотоника: состояние и перспективы».

По числу докладчиков и слушателей наибольший интерес вызвали следующие

направления: «Материалы микро- и наноэлектроники», «Информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства», «Биомедицинская электроника», «Информационные системы и технологии в цифровой экономике».

Перед слушателями секции «Менеджмент, маркетинг в электронике и информатике» с докладом «Об актуальных задачах управления наукоемкой организацией» выступил генеральный директор ООО «Молекулярные технологии и новые материалы» (Инновационный центр «Сколково»), заместитель председателя Гильдии предприятий высоких технологий и инноваций Совета инновационного территориального кластера «Зеленоград» канд. т. н. С. А. Фастов.

По результатам выступлений проведен конкурс на лучшую научную работу, авторами которой являются только студенты или только аспиранты. Лучшие доклады отмечены дипломами лауреатов и рекомендованы к публикации в сборнике статей конференции, который размещается в системе РИНЦ.

В рамках проекта «Разработка и исследование перспективных материалов и наноструктур для технологии безмасочной рентгеновской нанолитографии, применимой к созданию новой компонентной базы микро- и наноэлектроники с использованием источника синхротронного излучения» на конференции работала Школа «Синхротронное излучение и технологии наноэлектроники. Актуальное состояние и перспективы развития». На открытии Школы со вступительным словом выступил ректор МИЭТ чл.-корр. РАН, д. т. н., проф. В. А. Беспалов. В работе Школы приняли участие руководители, ученые и ведущие специалисты профильных предприятий: НИЦ «Курчатовский институт», Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, АО «Микрон» (Москва), Балтийский федеральный университет им. И. Канта (Калининград), ЮФУ (Таганрог) и др.

Проведение следующей 31-й конференции «Микроэлектроника и информатика – 2024» запланировано на апрель 2024 г.

Оргкомитет конференции

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал «Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА» публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- фундаментальные исследования;
- материалы электроники;
- технологические процессы и маршруты;
- элементы интегральной электроники;
- схемотехника и проектирование;
- микро- и наносистемная техника;
- интегральные радиоэлектронные устройства;
- биомедицинская электроника;
- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемы высшего образования.

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом *в двух экземплярах*.

2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.

3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).

4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: <http://ivuz-e.ru/authors/>

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна 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@mice.ru

http://ivuz-e.ru

