



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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 28

№ 2

март – апрель

Vol. 28

No. 2

March – April

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, № 2, 2023
март – апрель

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

Горбачевич 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 техно-
логический 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 17.04.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.

Объем 13,95 усл.печ.л., 12,24 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 22. Свободная цена.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

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

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

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

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

2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)

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

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

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

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

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

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

<i>Тарасов А. М., Дубков С. В., Ву Ван Зунг, Киселев Д. А., Сиротина А. П., Волкова Л. С., Рязанов Р. М., Громов Д. Г.</i> Исследование структурных и электрофизических свойств нанонитей титаната бария, полученных методом гидротермального синтеза.....	151
--	-----

Технологические процессы и маршруты

<i>Тимаков А. В., Горноста́й-Польский В. С., Шевяков В. И.</i> Многоуровневая металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе вольфрама. Физика и технология. Обзор	164
--	-----

Элементы интегральной электроники

<i>Кириллова А. В., Королёв М. А.</i> Исследование влияния плавающего кармана на характеристики КНИ КМОП-транзисторов	180
<i>Московская Ю. М., Бойченко Д. В.</i> Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве. I. Система и алгоритмы реализации для различных категорий изделий ..	189

Схемотехника и проектирование

<i>Шари́ков А. И., Шари́кова Е. М.</i> Масштабируемая ПЛИС-система выборки и хранения данных для конвейерной обработки видеопотока	202
<i>Шумарин С. В., Фролова Т. Н., Богачев А. М.</i> Методика идентификации параметров Spice-моделей КМОП-микросхем по температурным зависимостям их динамических характеристик...	212

Микро- и наносистемная техника

<i>Пью Вин Тун, Симонов Б. М., Тимошенко С. П.</i> Исследование возможностей повышения чувствительности МЭМС-датчика давления емкостного типа с мембранами различных геометрических форм	222
<i>Карамышев В. П.</i> Методики определения концентрации и подвижности в слоях областей пространственного заряда.....	232

Интегральные радиоэлектронные устройства

<i>Карачев Е. В., Благодатский Г. А., Смирнов С. В.</i> Информационная система поддержки принятия решений по управлению режимами работы когнитивного радио	244
--	-----

Информационно-коммуникационные технологии

<i>Чипчагов М. С., Кублик Е. И., Попов В. А.</i> Алгоритм индексации объектов рекомендательной системы	252
--	-----

Юбилей

Королёву Михаилу Александровичу – 90 лет	261
К сведению авторов	263



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 28, No. 2, 2023
March – April

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 17.04.2023. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed
sheets 13,95. Number of copies 130. Order no. 22. 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

- Tarasov A. M., Dubkov S. V., Vu Van Zung, Kiselev D. A., Sirotnina A. P., Volkova L. S., Ryazanov R. M., Gromov D. G.* Investigation of the structural and electrophysical properties of barium titanate nanowires produced by the hydrothermal synthesis..... 151

Technological processes and routes

- Timakov A. V., Gornostay-Polsky V. S., Shevyakov V. I.* Multilevel metallization of high-temperature silicon IC based on tungsten. Physics and technology. Review 164

Integrated electronics elements

- Kirillova A. V., Korolev M. A.* Research of the influence of floating body effects on SOI MOSFETs 180
Moskovskaya Yu. M., Boychenko D. V. Prediction analysis of the microcircuits' radiation hardness within fabrication process. I. System and implementation algorithms for various product categories 189

Circuit engineering and design

- Sharikov A. I., Sharikova E. M.* Scalable sample-and-hold FPGA system for pipelined video stream processing 202
Shumarin S. V., Frolova T. N., Bogachev A. M. Technique for identification of CMOS ICs Spice models parameters by temperature dependences of their dynamic characteristics 212

Micro- and nanosystem technology

- Phyo Win Tun, Simonov B. M., Timoshenkov S. P.* Investigation of the possibilities of increasing the sensitivity of a capacitive-type MEMS pressure sensor with membranes of various geometric shapes 222
Karamyshev V. P. Methods for determining the concentration and mobility in the layers of the space charge regions..... 232

Integrated radioelectronic devices

- Karachev E. V., Blagodatsky G. A., Smirnov S. V.* Decision support information system for cognitive radio operation mode management 244

Information-communication technologies

- Chipchagov M. S., Kublik E. I., Popov V. A.* Algorithm for indexing recommender system objects 252

Anniversaries

- Korolev Mikhail Aleksandrovich is 90 years old..... 261
Instructions for authors 263

Научная статья
УДК 537.226.86
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-2-151-163

**Исследование структурных и электрофизических свойств
нанонитей титаната бария, полученных методом
гидротермального синтеза**

*А. М. Тарасов¹, С. В. Дубков¹, Ву Ван Зунг¹, Д. А. Киселев², А. П. Сиротина³,
Л. С. Волкова³, Р. М. Рязанов^{1,4}, Д. Г. Громов^{1,5}*

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

²*Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», г. Москва, Россия*

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

⁴*НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия*

⁵*Первый Московский государственный медицинский университет
имени И. М. Сеченова Минздрава России*

u123168@edu.miet.ru

Аннотация. Исследование структурных и электрофизических свойств пьезоэлектриков является важной задачей для создания эффективных пьезоэлектрических наногенераторов, предназначенных для повышения автономности электронных устройств. Один из перспективных материалов для создания наногенераторов – титанат бария BaTiO_3 , для изучения свойств которого необходима специальная подготовка образца. В работе представлены результаты изучения электрофизических свойств отдельной нанонити BaTiO_3 , прикрепленной на поверхности подложки методами атомной силовой микроскопии. Формирование нанонитей BaTiO_3 проведено с применением двухстадийного гидротермального синтеза с использованием диоксида титана TiO_2 в качестве прекурсора и титаната натрия как промежуточного соединения. Исследованы морфология поверхности и фазовый состав нанонитей BaTiO_3 с использованием растрового электронного микроскопа и метода рентгеновской дифракции. Представлена методика закрепления отдельной нанонити BaTiO_3 на проводящей подложке для исследования пьезоэлектрических характеристик на атомном силовом микроскопе. Полученные нанонити BaTiO_3 имеют тетрагональную фазу со средней длиной ~ 14 мкм и диаметром 330 нм. Внутреннее напряжение нанонити составляет $-0,45$ В, пьезоэлектрический коэффициент $d_{33} = 5,2$ пм/В. Полученные данные подтверждают возможность применения нанонитей BaTiO_3 в наногенераторах и МЭМС-устройствах.

© А. М. Тарасов, С. В. Дубков, Ву Ван Зунг, Д. А. Киселев, А. П. Сиротина, Л. С. Волкова, Р. М. Рязанов, Д. Г. Громов, 2023

Ключевые слова: BaTiO₃, нанонити, атомный силовой микроскоп, пьезоэффект, гидротермальный синтез

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-19-00654).

Для цитирования: Исследование структурных и электрофизических свойств нанонитей титаната бария, полученных методом гидротермального синтеза / А. М. Тарасов, С. В. Дубков, Ву Ван Зунг и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 151–163. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-151-163>

Original article

Investigation of the structural and electrophysical properties of barium titanate nanowires produced by the hydrothermal synthesis

**A. M. Tarasov¹, S. V. Dubkov¹, Vu Van Zung¹, D. A. Kiselev², A. P. Sirotina³,
L. S. Volkova³, R. M. Ryazanov^{1,4}, D. G. Gromov^{1,5}**

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

²*National University of Science and Technology “MISiS”, Moscow, Russia*

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

⁴*SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia*

⁵*I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia*

u123168@edu.miet.ru

Abstract. The study of the structural and electrophysical properties of piezoelectrics is an important task for the creation of efficient piezoelectric nanogenerators designed to increase the autonomy of electronic devices. One of promising materials for nanogenerator creation is barium titanate BaTiO₃. Special sample preparation is required to study its properties. In this work, the results of studying the electrical properties of an individual BaTiO₃ nanowire attached to the substrate surface using atomic force microscopy are presented. The BaTiO₃ nanowires have been formed by two-stage hydrothermal synthesis using titanium dioxide TiO₂ as a precursor and sodium titanate an intermediate. The surface morphology and phase composition of BaTiO₃ nanowires were studied using a scanning electron microscope and X-ray diffraction. A technique for fixing an individual nanowire on a conductive substrate for studying piezoelectric characteristics using an atomic force microscope is presented. The BaTiO₃ nanowires obtained have a tetragonal phase with an average length of ~ 14 μm and a diameter of 330 nm. The internal voltage of the nanowire is –0.45 V. The piezoelectric coefficient d_{33} is 5.2 pm/V. The resulting data confirm the possibility to apply BaTiO₃ nanowires in nanogenerators and MEMS-devices.

Keywords: BaTiO₃, nanowires, atomic force microscope, piezoeffect, hydrothermal synthesis

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00654).

For citation: Tarasov A. M., Dubkov S. V., Zung Vu Van, Kiselev D. A., Sirotina A. P., Volkova L. S., Ryazanov R. M., Gromov D. G. Investigation of the structural and electrophysical properties of barium titanate nanowires produced by the hydrothermal synthesis. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 151–163. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-151-163>

Введение. Для работы носимых автономных электронных устройств требуется электроэнергия, получаемая либо из одноразовых батарей, либо из перезаряжаемых аккумуляторов. В зависимости от вида источника питания необходимо проводить периодическую его замену или зарядку от внешнего источника питания. Проблема особенно актуальна в медицине (например, для замены кардиостимулятора требуется инвазивная процедура) [1]. Решением данной проблемы могут стать автономные устройства, представляющие собой комбинацию наногенератора, подзаряжающего встроенную аккумуляторную батарею. Использование пьезоэлектрических наногенераторов для зарядки устройств носимой электроники – перспективное направление [2, 3]. Они могут «собирать» энергию механической деформации, возникающей при ходьбе, сгибании рук и ног. В качестве пьезоэлектрического материала для создания наногенератора может применяться титанат бария BaTiO_3 [4–6]. Также BaTiO_3 применяется в сенсорике [7], катализе [8], ячейках памяти [9], многослойных конденсаторах [10] и пьезоэлектрических детекторах [11].

Наноразмерный BaTiO_3 применяется в виде наночастиц (0D), нанонитей (1D) и тонких пленок (2D). Одномерные структуры характеризуются высокой удельной поверхностью и эффективным обменом носителями заряда [12]. Среди множества методов получения одномерных наноструктур BaTiO_3 можно выделить гидротермальный метод синтеза, который отличается высокой воспроизводимостью, низкими температурами синтеза и низкой себестоимостью [13]. Изучение пьезоэлектрических свойств наноразмерного BaTiO_3 традиционно проводится методом силовой микроскопии пьезоотклика (СМП). С помощью этого метода исследуются процессы локального переключения и релаксации сигнала пьезоотклика, устанавливается наличие внутреннего заряда, определяется направление поляризации (вертикальная и горизонтальная составляющие) и т. д. Результаты исследований во многом зависят от подготовки образцов. Известно, что для исследования пьезоэлектрических свойств методом СМП возможно использование образцов в виде спрессованного порошка [14] и массивов нанонитей, выращенных на поверхности подложки [15]. Однако при исследовании электрофизических свойств отдельного свободно лежащего нитевидного кристалла могут возникать проблемы, связанные со сканированием.

В настоящей работе с использованием метода СМП рассматриваются электрофизические свойства отдельной горизонтально расположенной нанонити BaTiO_3 и описывается разработанная методика закрепления единого кристалла на поверхности проводящей подложки.

Эксперимент. Нанонити BaTiO_3 получены двухстадийным гидротермальным синтезом [16]. На первой стадии проводили синтез титаната натрия в щелочном растворе. Для этого в фторопластовый контейнер объемом 100 мл помещали 50 мл 10 М раствора гидроксида натрия NaOH, 0,6 г коммерческого порошка диоксида титана TiO_2

Degussa P25 и перемешивали на магнитной мешалке HJ-3 в течение 30 мин. Затем контейнер с полученной суспензией помещали в автоклав. Нагрев автоклава осуществляли в муфельной печи Project 30/1250. Синтез проводили при температуре 250 °С в течение 12 ч. По окончании синтеза нагрев выключали и автоклав оставляли остывать до комнатной температуры.

Очистку полученных нанонитей от остатков щелочи проводили путем многократной их промывки в деионизованной воде, промывку – в лабораторном стакане с 400 мл деионизованной воды. Нанонити помещали в стакан и перемешивали на магнитной мешалке в течение 15 мин. Затем проводили вакуумную фильтрацию суспензии через фильтровальную воронку Шотта ПОР 16 с использованием колбы Бунзена и мембранного насоса GM-0,20. Промывку осуществляли до нейтрального pH (pH = 7). По окончании промывки нанонити помещали в деионизованную воду объемом 20 мл, перемешивали до образования однородной суспензии, которую выливали на безворсовую бумагу для последующей сушки.

Нанонити BaTiO₃ получали в результате гидротермальной реакции взаимодействия титаната натрия и гидроксида бария Ba(OH)₂. Для этого во фторопластовом контейнере объемом 150 мл приготавливали 50 мл 0,1 М водного раствора Ba(OH)₂, добавляли 0,3 г нанонитей TiO₂ и все перемешивали на магнитной мешалке в течение 30 мин. Полученную в контейнере суспензию помещали в автоклав, который нагревали в муфельной печи. Синтез проводили при температуре 210 °С в течение 9 ч. По окончании синтеза автоклав оставляли остывать до комнатной температуры. Полученные нанонити BaTiO₃ многократно промывали в деионизованной воде до pH = 7 описанным методом. После промывки нанонити сушили при температуре 90 °С в течение 12 ч.

Для исследования нанонитей методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) проводили подготовку образцов. Приготавливали водную суспензию, которую наносили на кремниевую подложку со слоем алюминия с помощью дозатора. Слой алюминия толщиной порядка 100 нм формировали методом магнетронного напыления. Перед нанесением алюминия подложка проходила стандартную очистку в травителях Каро и ПАР. Суспензию сушили в вытяжном шкафу до полного испарения воды.

Морфологию и закрепление нанонитей анализировали с помощью двухлучевого сканирующего электронно-ионного микроскопа Helios G4 CX. Изображение получено с применением детектора вторичных электронов, встроенного в объективную линзу. Детектор позволяет получать изображения высокого качества как при низких ускоряющих напряжениях, так и при коротких фокусных расстояниях. Ускоряющее напряжение равно 1 кВ, первичный ток пучка составляет 21 пА.

Фазовый состав нанонитей BaTiO₃ исследовали с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). КРС-спектр снимали на рамановском спектрометре LabRAM HR Evolution (Horiba) с использованием полупроводникового лазера с длиной волны 532 нм, мощностью 5 мВт и фокусирующей линзой со 100× увеличением.

Рентгенофазовый анализ полученного образца проводили на рентгеновском дифрактометре Malvern PanAnalytical Empyrean с фокусирующей схемой по Бреггу – Брентано с использованием двумерного полупроводникового детектора в режиме работы 1D. Дифрактограммы получены в режиме сканирования по углу 2θ-ω в диапазоне углов 2θ от 10 до 85° с использованием излучения CuK_α при параметрах рентгеновского источника 45 кВ и 40 мА. Шаг сканирования составлял 0,0131°. Дифрактограммы расшифрованы с помощью базы данных PDF2.

Пьезоэлектрический отклик нанонити BaTiO₃ исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NTEGRA Prima (NT-MDT SI, Россия) с установленным кантилевером

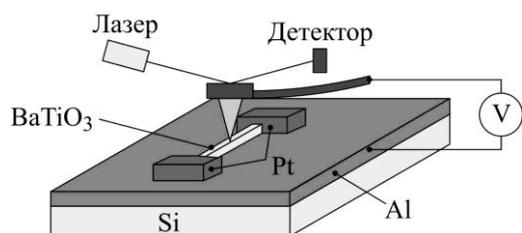


Рис. 1. Схема измерения отдельной нанонити методом СМП

Fig. 1. Scheme for measuring an individual nanowire by PFM

CSG10/Pt в режиме СМП. На зонд подавали переменное напряжение, равное 5 В, с частотой 190 кГц. Остаточные петли пьезоэлектрического гистерезиса получены на многофункциональном сканирующем зондовом микроскопе MFP-3D™ Stand Alone (Oxford Instruments Asylum Research, США) в режиме DART PFM вблизи контактного резонанса кантилевер – образец (~ 1,1 МГц), затем были скорректированы с использованием модели простого гармонического осциллятора [17–19]. Длительность импульса «записи» и «считывания» сигнала пьезоотклика составляла 25 мс. Схема измерения пьезоэлектрического отклика представлена на рис. 1.

Схема измерения пьезоэлектрического отклика представлена на рис. 1.

Результаты и их обсуждение. РЭМ-изображения полученных нанонитей титаната натрия и ВаТiО₃ представлены на рис. 2. Изначально нанонити Na₂TiO₃ (рис. 2, а) имели среднюю длину ~ 8 мкм и диаметр ~ 200 нм. Нанонити ВаТiО₃ (рис. 2, б), полученные в ходе гидротермального синтеза из нанонитей Na₂TiO₃, имеют длину ~ 14 мкм и диаметр ~ 330 нм. Наблюдаемое увеличение размеров нанонитей можно объяснить образованием ВаТiО₃.

Рентгенограммы нанонитей титаната натрия и ВаТiО₃, полученного после 9 ч синтеза, представлены на рис. 3. По рентгенограмме титаната натрия определить точный фазовый состав не представляется возможным. Наблюдаются пики, характерные для смеси соединений Na_xTi_yO_z с различной стехиометрией (Na_xTi₂O₄, Na₂Ti₆O₄, Na₂Ti₇O₁₅) [20]. Однако определить фазу нанонитей затруднительно. Обнаруженные пики на дифрактограмме могут соответствовать как параэлектрической кубической модификации ВаТiО₃, так и сегнетоэлектрической тетрагональной модификации. Сложность интерпретации полученных данных связана с тем, что отличие кубической модификации от тетрагональной заключается в искажении кристаллической решетки в одном из направлений. На дифрактограмме отличия сегнетоэлектрической тетрагональной фазы от кубической состоят в разделении пиков кубической фазы с определенным набором индексов (*hkl*). Так, для кубической решетки ВаТiО₃ рефлекс (200) для семейства эквивалентных плоскостей {200}, расположенный при $2\theta = 45,2^\circ$, из-за искажения кубической кристаллической решетки и образования тетрагональной фазы расщепляется на два рефлекса с неэквивалентными плоскостями (200) и (002) [21, 22]. В случае наноразмерных структур из-за малой области когерентного рассеяния происходят уширение пиков на дифрактограмме и перекрывание пиков от близлежащих рефлексов (200) и (002), что дополнительно усложняет процесс определения фазового состава [23]. Поэтому для определения наличия тетрагональной фазы совместно с рентгенофазовым анализом применялся метод КРС.

На рис. 4 представлены КРС-спектры нанонитей ВаТiО₃, на которых выделяются пики, расположенные на 185 см⁻¹ [A1(TO), E(LO)], 265 см⁻¹ [A1(TO)], 306 см⁻¹ [B1, E(TO + LO)], 520 см⁻¹ [A1, E(TO)] и 720 см⁻¹ [A1, E(LO)] [23]. Наличие связей A1(TO и LO) можно объяснить образованием тетрагонального ВаТiО₃. Таким образом, приведенный на рис. 4 КРС-спектр характерен для тетрагональной структуры ВаТiО₃ [24, 25]. Совокупность результатов рентгенофазового анализа и метода КРС позволяет сделать вывод о наличии тетрагональной фазы ВаТiО₃.

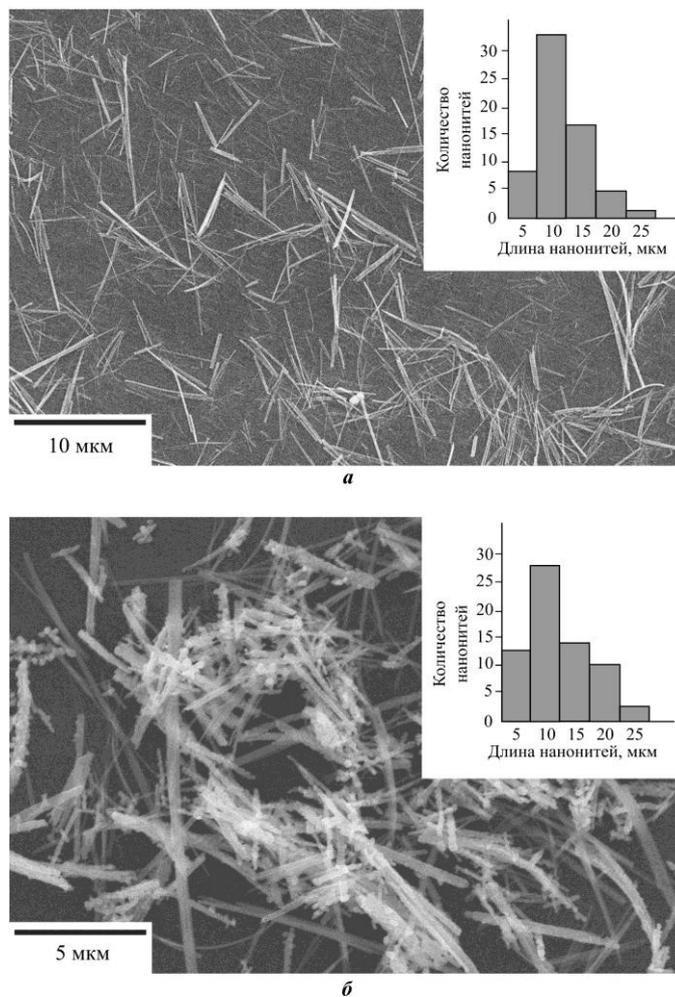


Рис. 2. РЭМ-изображения и гистограммы распределения по длине синтезированных нанонитей: а – титанат натрия, 12 ч синтеза; б – BaTiO₃, 9 ч синтеза

Fig. 2. SEM images and length distribution histograms of the synthesized nanowires: a – sodium titanate, 12 hours of synthesis; b – BaTiO₃, 9 hours of synthesis

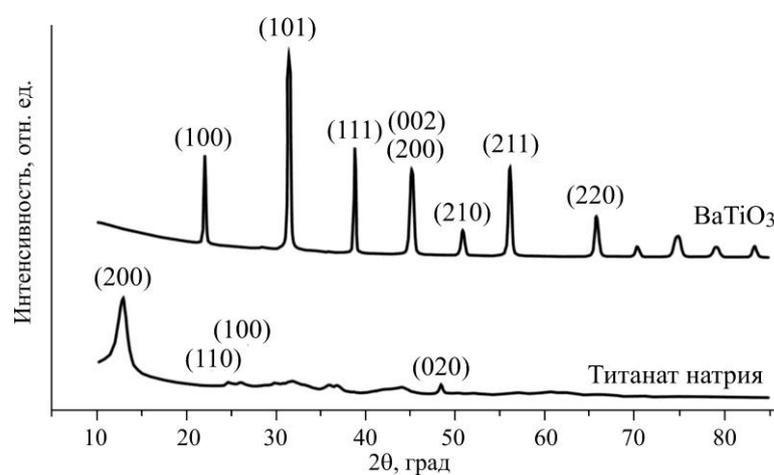


Рис. 3. Рентгенограммы нанонитей титаната натрия и BaTiO₃, синтезированного в течение 9 ч

Fig. 3. X-ray pattern of sodium titanate nanowires and BaTiO₃ synthesized within 9 hours

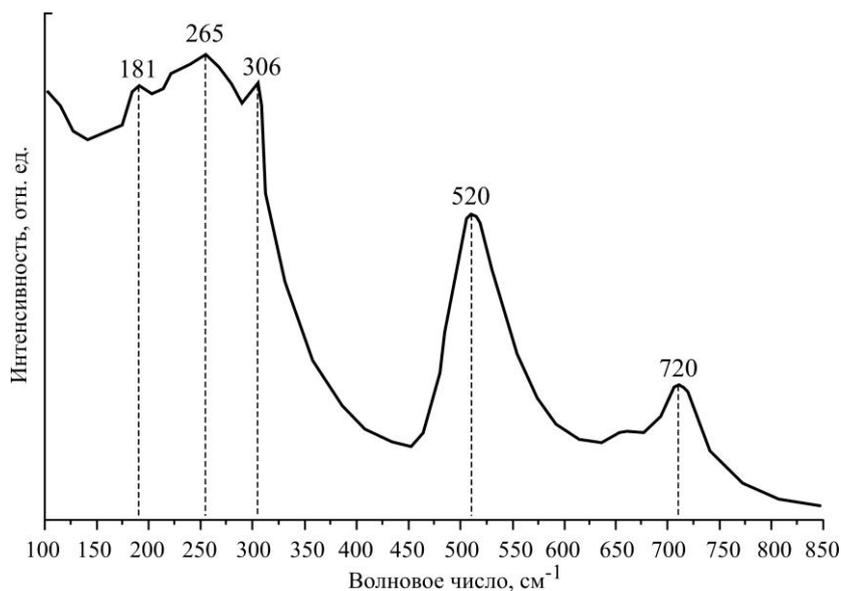


Рис. 4. КРС-спектр нанонитей BaTiO₃
 Fig. 4. Raman spectrum of BaTiO₃ nanowires

Для исследования пьезоэлектрического отклика образец одиночной нанонити BaTiO₃ прикрепляли к кремниевой подложке с использованием наноманипулятора с зондом и газовой инжекционной системы, вводящей прекурсор платины. Для того чтобы с использованием платины прикрепить конец стержня к зонду, его с помощью наноманипулятора подводили к краю нанонити. Затем, управляя манипулятором, зонд вместе с трубкой перемещали на подложку. С помощью фокусированного ионного пучка ионами галлия стравливалась платина, соединяющая конец нанонити и зонда. Далее, управляя манипулятором, зонд отводили в нулевое положение. Для закрепления нанонити к поверхности

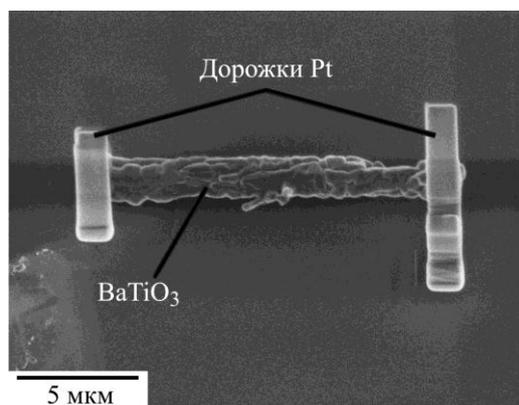


Рис. 5. РЭМ-изображение нанонити BaTiO₃, прикрепленной к кремниевой подложке
 Fig. 5. SEM image of a BaTiO₃ attached to silicon substrate nanowires

проводящей подложки (кремний со слоем алюминия толщиной порядка 100 нм) наносили линии из платины толщиной ~ 300 нм, шириной 300 нм и длиной 3 мкм сначала на один край нанонити, затем на противоположный, тем самым закрепляя нанонить на подложке. РЭМ-изображение прикрепленной нанонити BaTiO₃ представлено на рис. 5.

Прикрепленная к кремниевой подложке нанонить BaTiO₃, визуализированная методом СМП, имеет длину ~ 2,2 мкм и ширину ~ 350 нм (рис. 6, а). Вертикальный пьезоотклик, представленный на рис. 6, б, отрицательный, что говорит о направленности поляризации от поверхности в объем нанонити. Это объясняется большей частотой переменного напряжения (190 кГц), чем контактная резонансная частота системы кантилевер – нанонить (~ 175 кГц). Выбор такой частоты переменного напряжения обусловлен большей чувствительностью и возможностью выявления полезного сигнала. По сравнению с вертикальным у латерального пьезоэлектрического сигнала (рис. 6, в) наблюдается меньшее значение отклика по амплитуде, отличающееся на три порядка. Таким образом, можно сделать вывод о наличии преимущественной вертикальной поляризации у нанонитей BaTiO₃.

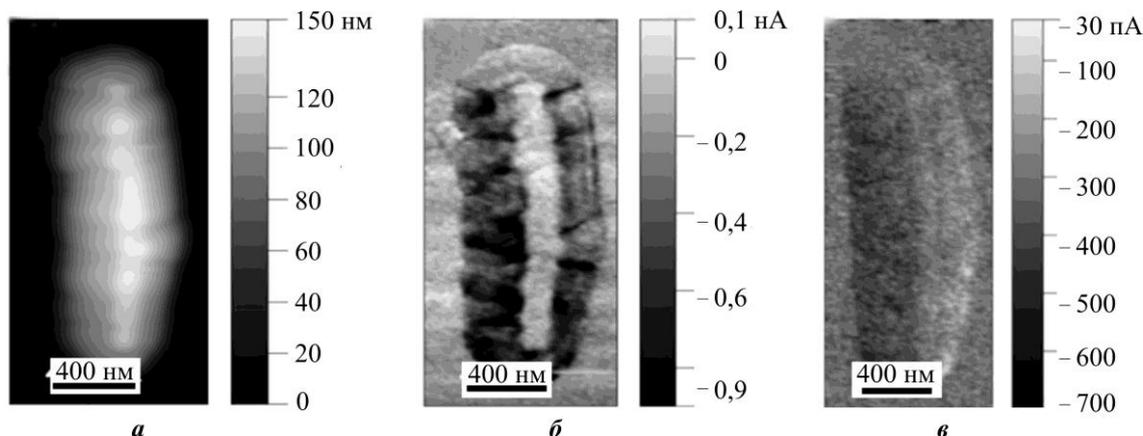


Рис. 6. Изображения прикрепленной к кремниевой подложке нанонити ВаТiО₃: а – топография нанонити; б – вертикальный сигнал пьезоэлектрического отклика; в – латеральный сигнал пьезоэлектрического отклика

Fig. 6. Image of BaTiO₃ nanowires attached to silicon substrate: a – nanowires topography; b – vertical piezoelectric response signal; c – lateral piezoelectric response signal

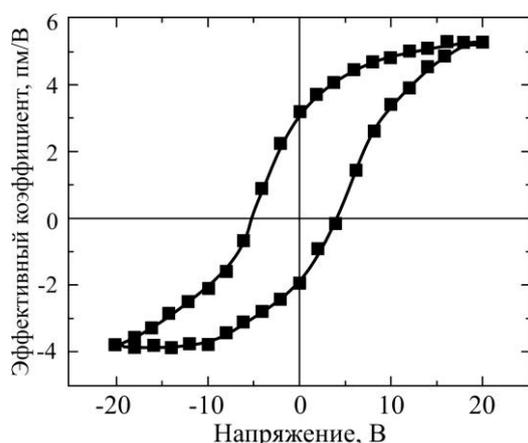


Рис. 7. Петля остаточного пьезоэлектрического гистерезиса

Fig. 7. Piezoelectric hysteresis loop (field-off mode or residual piezohysteresis loop)

Петля остаточного пьезоэлектрического гистерезиса (режим выключенного поля) представлена на рис. 7. Она характеризуется напряжением переключения $U_{C+} = 4,18$ В и $U_{C-} = -5,08$ В, в результате чего наблюдается асимметрия относительно оси напряжения ввиду наличия внутреннего напряжения смещения, которое составляет $-0,45$ В [25].

Значение пьезоэлектрического коэффициента $d_{33} \sim 5,2$ пм/В, что сопоставимо с результатами других исследований [26, 27]. Внутреннее электрическое поле в нанонитях ВаТiО₃ имеет положительный эффект при использовании их в пьезогенераторах и МЭМС-устройствах [28], однако его наличие не позволяет применять их в качестве функциональных слоев устройств неразрушаемой памяти (FeRAM) из-за паразитного эффекта предпочтительной ориентации спонтанной поляризации [29].

Заключение. В результате двухстадийного гидротермального синтеза в течение 9 ч получены нанонити ВаТiО₃ средней длиной ~ 14 мкм и диаметром ~ 330 нм. Проведенные исследования нанонитей подтвердили получение структур ВаТiО₃ с тетрагональной кристаллической решеткой. Применение разработанной методики прикрепления единичной нанонити к кремниевой подложке с контактными слоями позволило исследовать пьезоэлектрический отклик ВаТiО₃ методом СМП.

По результатам исследования пьезоэлектрического отклика установлено наличие преимущественного вертикального и слабого латерального откликов. Петли остаточного гистерезиса смещены относительно оси ординат. Внутреннее напряжение смещения составляет $-0,45$ В. Отрицательные значения пьезоэлектрического отклика говорят о наличии внутреннего электрического поля, что является важным условием применения данного материала в наногенераторах и МЭМС-устройствах.

Литература

1. Shape-controlled monocrystalline ferroelectric barium titanate nanostructures: From nanotubes and nanowires to ordered nanostructures / **N. Bao, L. Shen, G. Srinivasan et al.** // *J. Phys. Chem. C*. 2008. Vol. 112. Iss. 23. P. 8634–8642. <https://doi.org/10.1021/jp802055a>
2. Fingerprints of relaxor ferroelectrics: Characteristic hierarchical domain configurations and quantitative performances / **J. Bian, P. Xue, R. Zhu et al.** // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 21. Art. No. 100789. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100789>
3. **Briscoe J., Dunn S.** Piezoelectric nanogenerators – a review of nanostructured piezoelectric energy harvesters // *Nano Energy*. 2015. Vol. 14. P. 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.059>
4. Enhancement of pyroelectric catalysis of ferroelectric BaTiO₃ crystal: The action mechanism of electric poling / **L. Chen, H. Li, Z. Wu et al.** // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 10B. P. 16763–16769. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.252>
5. **Gannepalli A., Yablon D. G., Tsou A. H., Proksch R.** Mapping nanoscale elasticity and dissipation using dual frequency contact resonance AFM // *Nanotechnology*. 2011. Vol. 22. No. 35. Art. No. 355705. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/35/355705>
6. Effects of final annealing in oxygen on characteristics of BaTiO₃ thin films for resistance random access memory / **S. Hashimoto, T. Sugie, Z. Zhang et al.** // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 54. No. 10S. Art. ID: 10NA12. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.10NA12>
7. **Hayashi H., Nakamura T., Ebina T.** In-situ Raman spectroscopy of BaTiO₃ particles for tetragonal–cubic transformation // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2013. Vol. 74. Iss. 7. P. 957–962. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2013.02.010>
8. Strategies to achieve high performance piezoelectric nanogenerators / **D. Hu, M. Yao, Y. Fan et al.** // *Nano Energy*. 2019. Vol. 55. P. 288–304. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.053>
9. Large piezoelectric strain in sub-10 nanometer two-dimensional polyvinylidene fluoride nanoflakes / **N. Hussain, M.-H. Zhang, Q. Zhang et al.** // *ACS Nano*. 2019. Vol. 13. Iss. 4. P. 4496–4506. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b00104>
10. Piezoelectric energy conversion by lead-free perovskite BaTiO₃ nanotube arrays fabricated using electrochemical anodization / **C. K. Jeong, J. H. Lee, D. Y. Hyeon et al.** // *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 512. Art. ID: 144784. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144784>
11. Interplay between size, composition, and phase transition of nanocrystalline Cr³⁺-doped BaTiO₃ as a path to multiferroism in perovskite-type oxides / **L. Ju, T. Sabergharesou, K. G. Stamplecoskie et al.** // *J. Am. Chem. Soc.* 2012. Vol. 134. Iss. 2. P. 1136–1146. <https://doi.org/10.1021/ja2091678>
12. **Kaya İ. C., Kalem V., Akyildiz H.** Hydrothermal synthesis of pseudocubic BaTiO₃ nanoparticles using TiO₂ nanofibers: Study on photocatalytic and dielectric properties // *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2019. Vol. 16. Iss. 4. P. 1557–1569. <https://doi.org/10.1111/ijac.13225>
13. Hydrothermal synthesis and characterization of nanorods of various titanates and titanium dioxide / **Yu. V. Kolen'ko, K. A. Kovnir, A. I. Gavrillov et al.** // *Phys. Chem. B*. 2006. Vol. 110. Iss. 9. P. 4030–4038. <https://doi.org/10.1021/jp055687u>
14. **Kulek J., Szafraniak I., Hilczer B., Połomska M.** Dielectric and pyroelectric response of PVDF loaded with BaTiO₃ obtained by mechanosynthesis // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2007. Vol. 353. Iss. 47–51. P. 4448–4452. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.02.077>
15. Piezoresponse force microscopy studies on the domain structures and local switching behavior of Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O₃-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ single crystals / **Q. Li, Y. Liu, R. L. Withers et al.** // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112. Iss. 5. Art. No. 052006. <https://doi.org/10.1063/1.4745979>
16. BaTiO₃-based multilayers with outstanding energy storage performance for high temperature capacitor applications / **W.-B. Li, D. Zhou, R. Xu et al.** // *ACS Appl. Energy Mater.* 2019. Vol. 2. Iss. 8. P. 5499–5506. <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b00664>
17. Large and electric field tunable superelasticity in BaTiO₃ crystals predicted by an incremental domain switching criterion / **Y. W. Li, X. B. Ren, F. X. Li et al.** // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. Iss. 9. Art. No. 092905. <https://doi.org/10.1063/1.4795330>
18. Effect of BaTiO₃ on the sensing properties of PVDF composite-based capacitive humidity sensors / **S. Mallick, Z. Ahmad, K. W. Qadir et al.** // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 3. P. 2949–2953. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.291>
19. **Qian W., Wu H., Yang Y.** Ferroelectric BaTiO₃ based multi-effects coupled materials and devices // *Adv. Electron. Mater.* 2022. Vol. 8. Iss. 10. Art. No. 2200190. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200190>
20. **Sabry R. S., Hussein A. D.** PVDF: ZnO/BaTiO₃ as high out-put piezoelectric nanogenerator // *Polymer Testing*. 2019. Vol. 79. Art. No. 106001. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106001>

21. *Shiratori Y., Pithan C., Dornseiffer J., Waser R.* Raman scattering studies on nanocrystalline BaTiO₃. Part 1: Isolated particles and aggregates // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2007. Vol. 38. Iss. 10. P. 1288–1299. <https://doi.org/10.1002/jrs.1764>
22. Enhanced energy harvesting ability of polydimethylsiloxane-BaTiO₃-based flexible piezoelectric nanogenerator for tactile imitation application / *H. Su, X. Wang, C. Li et al.* // *Nano Energy*. 2021. Vol. 83. Art. ID: 105809. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105809>
23. Hydrothermal synthesis of barium titanate nano/microrods and particle agglomerates using a sodium titanate precursor / *R. A. Surmenev, R. V. Chernozem, A. G. Skirtach et al.* // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Iss. 7A. P. 8904–8914. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.011>
24. Ultrathin BaTiO₃ nanowires with high aspect ratio: A simple one-step hydrothermal synthesis and their strong microwave absorption / *J. Yang, J. Zhang, C. Liang et al.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. Vol. 5. Iss. 15. P. 7146–7151. <https://doi.org/10.1021/am4014506>
25. Characterizing and optimizing piezoelectric response of ZnO nanowire/PMMA composite-based sensor / *X. Zhang, J. Villafuerte, V. Consonni et al.* // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. Iss. 7. Art. No. 1712. <https://doi.org/10.3390/nano11071712>
26. *Zheng Q., Tang Q., Wang Z. L., Li Z.* Self-powered cardiovascular electronic devices and systems // *Nat. Rev. Cardiol.* 2021. Vol. 18. No. 1. P. 7–21. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-0426-4>
27. *Zhou Z., Tang H., Sodano H. A.* Vertically aligned arrays of BaTiO₃ nanowires // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. Vol. 5. Iss. 22. P. 11894–11899. <https://doi.org/10.1021/am403587q>
28. *Murali P.* Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // *Electroceraic-based MEMS* / ed. N. Setter. Boston, MA: Springer, 2005. P. 81–113. https://doi.org/10.1007/0-387-23319-9_5
29. Внутреннее поле и самополяризация в тонких пленках цирконата-титаната свинца / *В. В. Осипов, Д. А. Киселев, Е. Ю. Кантелов и др.* // *Физика твердого тела*. 2015. Т. 57. № 9. С. 1748–1754.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 06.12.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Тарасов Андрей Михайлович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), u123168@edu.miet.ru

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

Ву Ван Зунг – магистрант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vandungph2605@gmail.com

Киселев Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией физики оксидных сегнетоэлектриков Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1), dm.kiselev@misis.ru

Сиротина Анна Петровна – кандидат химических наук, научный сотрудник отдела разработок и исследования микро- и наносистем Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), ansipe@mail.ru

Волкова Лидия Сергеевна – младший научный сотрудник отдела структурного анализа и метрологии Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 199334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), liidiya.volkova.96@mail.ru

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

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

References

1. Bao N., Shen L., Srinivasan G., Yanagisawa K., Gupta A. Shape-controlled monocrystalline ferroelectric barium titanate nanostructures: From nanotubes and nanowires to ordered nanostructures. *J. Phys. Chem. C*, 2008, vol. 112, iss. 23, pp. 8634–8642. <https://doi.org/10.1021/jp802055a>
2. Bian J., Xue P., Zhu R., Wang L., Yang B., Li T., Hu Q., Shen L., Wang J., Lu G., Yang Y. Fingerprints of relaxor ferroelectrics: Characteristic hierarchical domain configurations and quantitative performances. *Applied Materials Today*, 2020, vol. 21, art. no. 100789. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100789>
3. Briscoe J., Dunn S. Piezoelectric nanogenerators – a review of nanostructured piezoelectric energy harvesters. *Nano Energy*, 2015, vol. 14, pp. 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.059>
4. Chen L., Li H., Wu Z., Feng L., Yu S., Zhang H., Gao J., Mai Y.-W., Jia Y. Enhancement of pyroelectric catalysis of ferroelectric BaTiO₃ crystal: The action mechanism of electric poling. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 10B, pp. 16763–16769. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.252>
5. Gannepalli A., Yablon D. G., Tsou A. H., Proksch R. Mapping nanoscale elasticity and dissipation using dual frequency contact resonance AFM. *Nanotechnology*, 2011, vol. 22, no. 35, art. no. 355705. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/35/355705>
6. Hashimoto S., Sugie T., Zhang Z., Yamashita K., Noda M. Effects of final annealing in oxygen on characteristics of BaTiO₃ thin films for resistance random access memory. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 54, no. 10S, art. ID: 10NA12. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.10NA12>
7. Hayashi H., Nakamura T., Ebina T. In-situ Raman spectroscopy of BaTiO₃ particles for tetragonal–cubic transformation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2013, vol. 74, iss. 7, pp. 957–962. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2013.02.010>
8. Hu D., Yao M., Fan Y., Ma C., Fan M., Liu M. Strategies to achieve high performance piezoelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 2019, vol. 55, pp. 288–304. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.053>
9. Hussain N., Zhang M.-H., Zhang Q., Zhou Z., Xu X., Murtaza M., Zhang R., Wei H., Ou G., Wang D. et al. Large piezoelectric strain in sub-10 nanometer two-dimensional polyvinylidene fluoride nanoflakes. *ACS Nano*, 2019, vol. 13, iss. 4, pp. 4496–4506. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b00104>
10. Jeong C. K., Lee J. H., Hyeon D. Y., Kim Y., Kim S., Baek C., Lee G.-J., Lee M.-K., Park J.-J., Park K.-I. Piezoelectric energy conversion by lead-free perovskite BaTiO₃ nanotube arrays fabricated using electrochemical anodization. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 512, art. ID: 144784. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144784>
11. Ju L., Sabergharesou T., Stampleskoskie K. G., Hegde M., Wang T., Combe N. A., Wu H., Radovanovic P. V. Interplay between size, composition, and phase transition of nanocrystalline Cr³⁺-doped BaTiO₃ as a path to multiferroism in perovskite-type oxides. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, vol. 134, iss. 2, pp. 1136–1146. <https://doi.org/10.1021/ja2091678>
12. Kaya İ. C., Kalem V., Akyildiz H. Hydrothermal synthesis of pseudocubic BaTiO₃ nanoparticles using TiO₂ nanofibers: Study on photocatalytic and dielectric properties. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 1557–1569. <https://doi.org/10.1111/ijac.13225>
13. Kolen'ko Yu. V., Kovniir K. A., Gavrilov A. I., Garshev A. V., Frantti J., Lebedev O. I., Churagulov B. R., Van Tendeloo G., Yoshimura M. Hydrothermal synthesis and characterization of nanorods of various titanates and titanium dioxide. *J. Phys. Chem. B*, 2006, vol. 110, iss. 9, pp. 4030–4038. <https://doi.org/10.1021/jp055687u>

14. Kułak J., Szafraniak I., Hilczer B., Połomska M. Dielectric and pyroelectric response of PVDF loaded with BaTiO₃ obtained by mechanosynthesis. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, vol. 353, iss. 47–51, pp. 4448–4452. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.02.077>
15. Li Q., Liu Y., Withers R. L., Wan Y., Li Z., Xu Z. Piezoresponse force microscopy studies on the domain structures and local switching behavior of Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O₃-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ single crystals. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 112, iss. 5, art. no. 052006. <https://doi.org/10.1063/1.4745979>
16. Li W.-B., Zhou D., Xu R., Wang D.-W., Su J.-Z., Pang L.-X., Liu W.-F., Chen G.-H. BaTiO₃-based multilayers with outstanding energy storage performance for high temperature capacitor applications. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2019, vol. 2, iss. 8, pp. 5499–5506. <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b00664>
17. Li Y. W., Ren X. B., Li F. X., Luo H. S., Fang D. N. Large and electric field tunable superelasticity in BaTiO₃ crystals predicted by an incremental domain switching criterion. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, iss. 9, art. no. 092905. <https://doi.org/10.1063/1.4795330>
18. Mallick S., Ahmad Z., Qadir K. W., Rehman A., Shakoor R. A., Touati F., Al-Muhtaseb S. A. Effect of BaTiO₃ on the sensing properties of PVDF composite-based capacitive humidity sensors. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 3, pp. 2949–2953. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.291>
19. Qian W., Wu H., Yang Y. Ferroelectric BaTiO₃ based multi-effects coupled materials and devices. *Adv. Electron. Mater.*, 2022, vol. 8, iss. 10, art. no. 2200190. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200190>
20. Sabry R. S., Hussein A. D. PVDF: ZnO/BaTiO₃ as high out-put piezoelectric nanogenerator. *Polymer Testing*, 2019, vol. 79, art. no. 106001. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106001>
21. Shiratori Y., Pithan C., Dornseiffer J., Waser R. Raman scattering studies on nanocrystalline BaTiO₃. Part 1. Isolated particles and aggregates. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2007, vol. 38, iss. 10, pp. 1288–1299. <https://doi.org/10.1002/jrs.1764>
22. Su H., Wang X., Li C., Wang Z., Wu Y., Zhang J., Zhang Y., Zhao C., Wu J., Zheng H. Enhanced energy harvesting ability of polydimethylsiloxane-BaTiO₃-based flexible piezoelectric nanogenerator for tactile imitation application. *Nano Energy*, 2021, vol. 83, art. ID: 105809. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105809>
23. Surmenev R. A., Chernozem R. V., Skirtach A. G., Bekareva A. S., Leonova L. A., Mathur S., Ivanov Yu. F., Surmeneva M. A. Hydrothermal synthesis of barium titanate nano/microrods and particle agglomerates using a sodium titanate precursor. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, iss. 7A, pp. 8904–8914. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.011>
24. Yang J., Zhang J., Liang C., Wang M., Zhao P., Liu M., Liu J., Che R. Ultrathin BaTiO₃ nanowires with high aspect ratio: A simple one-step hydrothermal synthesis and their strong microwave absorption. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, vol. 5, iss. 15, pp. 7146–7151. <https://doi.org/10.1021/am4014506>
25. Zhang X., Villafuerte J., Consonni V., Capsal J.-F., Cottinet P.-J., Petit L., Le M.-Q. Characterizing and optimizing piezoelectric response of ZnO nanowire/PMMA composite-based sensor. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, iss. 7, art. no. 1712. <https://doi.org/10.3390/nano11071712>
26. Zheng Q., Tang Q., Wang Z. L., Li Z. Self-powered cardiovascular electronic devices and systems. *Nat. Rev. Cardiol.*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 7–21. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-0426-4>
27. Zhou Z., Tang H., Sodano H. A. Vertically aligned arrays of BaTiO₃ nanowires. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, vol. 5, iss. 22, pp. 11894–11899. <https://doi.org/10.1021/am403587q>
28. Muralt P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films. *Electroceramic-based MEMS*, ed. N. Setter. Boston, MA, Springer, 2005, pp. 81–113. https://doi.org/10.1007/0-387-23319-9_5
29. Osipov V. V., Kiselev D. A., Kaptelov E. Yu., Senkevich S. V., Pronin I. P. Internal field and self-polarization in lead zirconate-titanate thin films. *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, iss. 9, pp. 1793–1799. <https://doi.org/10.1134/S1063783415090267>

The article was submitted 16.11.2022; approved after reviewing 06.12.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Andrey M. Tarasov – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), u123168@edu.miet.ru

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

Zung Vu Van – 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), vandungph2605@gmail.com

Dmitry A. Kiselev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Physics of Oxide Ferroelectrics Laboratory, National Research Technological University “MISIS” (Russia, 119049, Moscow, Leninsky ave., 4), dm.kiselev@misis

Anna P. Sirotina – Cand. Sci. (Chem.), Scientific Researcher of the Development and Research of Micro- and Nanosystems Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), ansipe@mail.ru

Lidiya S. Volkova – Junior Scientific Researcher of the Structural Analysis and Metrology Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 199334, Moscow, Leninsky ave., 32A), lidiya.volkova.96@mail.ru

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

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

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS
Vol. 51, No. 7, 2022. - ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи
журнала «Известия вузов. Электроника».

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Обзорная статья

УДК 621.382.049.77:658.274

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-2-164-179

Многоуровневая металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе вольфрама. Физика и технология. Обзор

А. В. Тимаков, В. С. Горностай-Польский, В. И. Шевяков

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

Shev@dtd.miee.ru

Аннотация. В настоящее время к функциональным узлам ИС предъявляются все более жесткие требования. Одно из них – высококачественные межсоединения. Применение стандартных металлов не может в полной мере обеспечить работу приборов при температурах 200 °С и выше. Поэтому интерес представляют тугоплавкие металлы, например вольфрам. Он характеризуется высокими показателями электромиграционной стойкости, однако имеет низкую пластичность, что приводит к плохой адгезии к кремнию и растрескиванию материала, в связи с чем снижается эффективность его использования для металлизации межсоединений ИС. В работе на основе анализа литературных данных показано, что добавление рения в вольфрам обеспечивает получение пластичных проводниковых межсоединений, характеризующихся удовлетворительной адгезионной способностью. Установлено, что аналогичный рению эффект имеют титан и азот. Они также снижают механические напряжения в пленках вольфрама и повышают их адгезионную способность. Результаты анализа литературных источников позволяют сделать вывод, что межсоединения на основе вольфрама с различными легирующими примесями, такими как рений, титан и азот, могут применяться в качестве функционального материала межсоединений в высокотемпературной электронике.

Ключевые слова: металлизация, вольфрам, сплавы вольфрама, рениевый эффект, электромиграция, механические свойства, адгезия

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-29-01095).

Для цитирования: Тимаков А. В., Горностай-Польский В. С., Шевяков В. И. Многоуровневая металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе вольфрама. Физика и технология. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 164–179. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-164-179>

© А. В. Тимаков, В. С. Горностай-Польский, В. И. Шевяков, 2023

Review article

Multilevel metallization of high-temperature silicon IC based on tungsten. Physics and technology. Review

A. V. Timakov, V. S. Gornostay-Polsky, V. I. Shevyakov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Shev@dsd.miee.ru

Abstract. Currently, the increasingly higher requirements are imposed upon functional nodes of ICs. One of these requirements is interconnection metallization. The use of ordinary metals cannot fully enable devices operation at temperatures 200 °C and above. Therefore refractory metals, for example tungsten, are advantageous. Tungsten is characterized by increased electromigration resistance; however, it is a brittle, rigid material with a low adhesive ability to silicon and silicon oxide. This reduces the efficiency of its use for IC interconnection metallization. In this work, it was shown based on the analysis of the literature that the addition of rhenium to tungsten provides the production of yielding conductive interconnections characterized by satisfactory adhesion ability. It has been established that titanium and nitrogen have an effect similar to rhenium. These materials also reduce mechanical stresses in tungsten films and increase their adhesive ability. Results of literature sources analysis allow for the conclusion that the interconnections based on tungsten with various dopants such as rhenium, titanium and nitrogen can be used as functional material in high-temperature electronics.

Keywords: metallization, tungsten, tungsten alloys, rhenium effect, electromigration, mechanical properties, adhesion

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-29-01095).

For citation: Timakov A. V., Gornostay-Polsky V. S., Shevyakov V. I. Multilevel metallization of high-temperature silicon IC based on tungsten. Physics and technology. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 164–179. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-164-179>

Введение. В настоящее время разрабатываются и производятся кремниевые полупроводниковые приборы и ИС, которые могут функционировать при температуре 200 °C и выше [1–15]. Применение изделий высокотемпературной кремниевой микроэлектроники и микросистемной техники в оборудовании, эксплуатируемом при высоких рабочих температурах, позволит обеспечить надежность функционирования, например, нефтеперерабатывающих заводов, авиакосмической техники, авто- и электромобилей, атомных и тепловых электростанций и т. д.

На сегодняшний день существует спрос на создание высокотемпературных ИС, где необходима высокотемпературная металлизация, для которой подходят тугоплавкие металлы, в частности вольфрам. Он имеет высокую электромиграционную стойкость, но при этом формирование его тонких пленок значительно осложнено из-за его плохих механических свойств (низкая пластичность и адгезия к кремнию).

Одно из основных требований к функциональным узлам ИС – высококачественные межсоединения, на которые налагаются жесткие требования (увеличение электромиграционной стойкости, химическая инертность материала с окружающими его слоями, низкий уровень старения материала). В настоящей работе приводятся результаты анализа современного состояния технологии кремниевых ИС и сведения по использованию многоуровневой металлизации.

Физика функционирования кремниевых МОП-транзисторов при повышенных температурах. Рабочий диапазон температуры активных элементов интегральной микро- и нанoeлектроники, сформированных в объеме полупроводника, связан с шириной запрещенной зоны полупроводника [16]. Для каждого из полупроводников существует предельная температура, выше которой негативное влияние на функционирование устройств начинает оказывать собственная проводимость полупроводника. У кремния ширина запрещенной зоны составляет 1,12 эВ, а у таких полупроводников, как карбид кремния и нитрид галлия, ширина запрещенной зоны равна 3,3 и 3,4 эВ соответственно. Устройства на основе данных полупроводников могут функционировать при температурах выше 600 °С. Однако только для кремния характерна высокоразвитая технология получения кремниевых подложек. В настоящее время формируют подложки диаметром 400 мм. Широко освоены технологии создания на основе кремния полупроводниковых приборов и ИС высокой степени интеграции. Такие изделия сравнительно дешевые. Актуальным является вопрос расширения температурного диапазона функционирования кремниевых устройств.

Собственная концентрация носителей заряда n_i в полупроводнике описывается выражением [17]

$$n_i = 3,9 \cdot 10^{16} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(\frac{-E_G(0)}{2kT}\right),$$

где T – температура; $E_G(0)$ – ширина запрещенной зоны полупроводника; k – постоянная Больцмана.

Для сильнолегированного полупроводника n -типа проводимости концентрация основных носителей заряда n_0 определяется как $n_0 p_0 = n_i^2$. Для невырожденного равновесного полупроводника условие электронейтральности следующее:

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D,$$

где N_A и N_D – концентрации акцепторной и донорной примесей соответственно.

Из данного уравнения для n_0 при $N_A = 0$ получаем выражение для определения концентрации основных носителей заряда:

$$n_0 \approx \frac{1}{2} \left[\sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} + N_D \right].$$

На рис. 1 представлены зависимости собственной концентрации носителей заряда n_i , а также концентрации основных носителей заряда n_0 для полупроводника n -типа в зависимости от температуры и концентрации легирующей примеси N_D . Как следует из рисунка, при температуре ниже температуры перехода концентрация основных носителей практически не зависит от температуры. Она определяется концентрацией легирующей примеси. При повышении температуры этот параметр зависит от нее экспоненциально.

ИС должны работать в диапазоне температур ниже температуры перехода. Этого можно достичь, повышая концентрацию легирующей примеси. Однако такой подход ограничен в связи с критическим увеличением токов утечки, поэтому необходимо уменьшить ток утечки для работы транзисторов при повышенных температурах. Еще один ограничивающий фактор – снижение порогового напряжения транзисторов с повышением температуры. Критически низкое значение данного параметра может привести к несвоевременному открытию транзистора, в результате чего микросхема будет работать нестабильно. Значительный вклад в ток утечки также вносит подпороговый ток, который увеличивается при уменьшении порогового напряжения транзистора. Поэтому необходимо обеспечить транзистору достаточное пороговое напряжение при высоких температурах.

На рис. 2 приведена зависимость порогового напряжения КНИ МОП-транзистора от температуры [17]. При температуре 400 °С пороговое напряжение снижается до значений порядка сотен микровольт. В этом случае значительно увеличивается подпороговый ток утечки. В работе [17] экспериментально установлена зависимость подпорогового тока утечки и тока утечки $p-n$ -перехода при температурах 50–400 °С.

На рис. 3 представлены входные ВАХ n -канального КНИ КМОП-транзистора (комплементарная логика, основанная на МДП-транзисторах) в зависимости от температуры [17]. При работе транзистора в диапазоне низких температур (до 100 °С) ток утечки составляет порядка 1 пА. Повышение температуры до 400 °С приводит к увеличению его значения до 0,5 мкА. Таким образом, как следует из рис. 3, при повышенных температурах преобладает подпороговый ток утечки, и его снижение – главная задача КНИ-структур. Стабильная работа таких приборов возможна только в режимах сильной

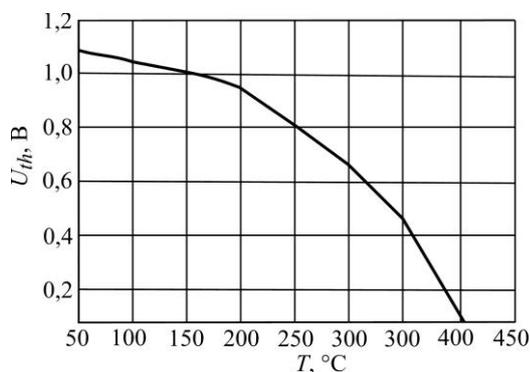


Рис. 2. Зависимость порогового напряжения КНИ МОП-транзистора от температуры [17]
Fig. 2. Dependence of threshold voltage SOI MOS transistor on temperature [17]

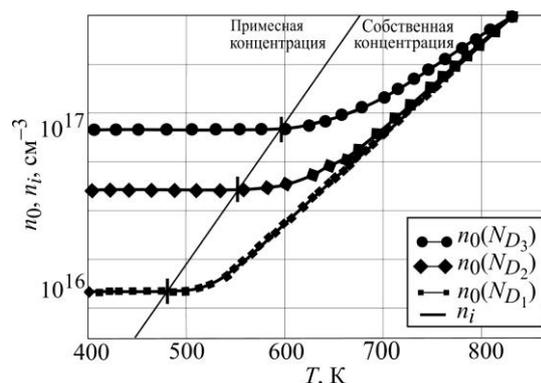


Рис. 1. Зависимость концентрации основных и собственных носителей заряда от температуры при различной концентрации легирующей примеси ($N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$) [17]

Fig. 1. Dependence of the concentration of the main and proper charge carriers on temperature at different concentrations of dopant ($N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$) [17]

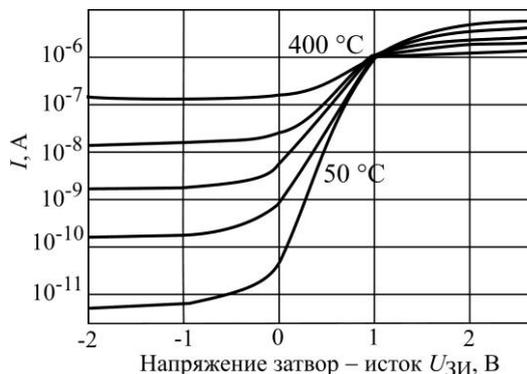


Рис. 3. Входные ВАХ n -канального КНИ КМОП-транзистора для температур от 50 до 400 °С [17]
Fig. 3. Input volt-ampere characteristics of the n -channel SOI CMOS transistor for temperatures from 50 to 400 °С [17]

инверсии, но требования к работе устройств обусловлены не только работой самого транзистора, но и возможностью его управления посредством металлических коммутирующих межсоединений.

Современное состояние технологии многоуровневой металлизации ИС. Металлизация ИС – это консервативный функциональный слой, поскольку является основным сдерживающим фактором при масштабном уменьшении элементов ИС. Миниатюризация логических элементов приводит к повышению их быстродействия, однако металлизация имеет и обратный эффект, так как уменьшение поперечного сечения проводника влечет за собой увеличение сопротивления. Еще один негативный эффект заключается в уменьшении расстояния между проводниками, в результате чего увеличиваются паразитные емкости. В связи с указанными недостатками при достижении критического уровня интеграции влияние металлизации на быстродействие становится определяющим, а задержки при коммутации могут превышать время работы самих логических элементов. Уменьшение толщины проводников приводит к снижению электромиграционной стойкости. Соответственно, возникают новые технологические проблемы, связанные со сложностью травления при минимальных размерах. Уменьшение размеров элементов приводит к увеличению переходных сопротивлений.

При современных технологических подходах рассматривается многоуровневая металлизация ИС. Приведем данные по изменению количества уровней металлизации в соответствии с годом разработки СБИС: 2012 г. – 12; 2014 г. – 13; 2016 г. – 13; 2018 г. – 14; 2019 г. – 14; 2022 г. – 15. Формирование многоуровневой системы металлизации осложняется планаризацией слоев ИС.

В связи с проблемами создания металлизации ИС возникает необходимость разработки новых технологических решений. На сегодняшний день сформированы универсальные подходы к проектированию и производству элементов межсоединений и проводников в целом. Выделяют такие функциональные элементы многоуровневой металлизации, как контактная система, межсоединения, внутренний и межслойный диэлектрик, контакт между уровнями, пассивационные слои, контактные площадки.

Для создания системы металлизации КМОП ИС с субмикронными и нанометровыми минимальными размерами применяют технологию Salicide, обеспечивающую формирование силицидных малопроникающих термостабильных омических контактов к кремнию. Данная технология представляет собой одновременное формирование самосовмещенных с исток-стоковыми областями силицидных контактов и полицидных затворов [18]. Последовательность операций технологии Salicide при создании контактной металлизации в структуре *p*-канального кремниевого МОП-транзистора проиллюстрирована на рис. 4.

После формирования затворной области и самосовмещенных с границами затворной области исток-стоковых участков осаждают слой диэлектрика и проводят его реакционно-ионное травление, полностью удаляя диэлектрик с латеральных областей и тем самым формируя по периферии локальных поликремниевых затворных областей оксидные участки (спейсеры) (рис. 4, *a*). Далее формируют металлический слой Ti (рис. 4, *b*), проводят термообработку с целью образования в твердой фазе слоя силицида титана $TiSi_2$ в тех областях, которые прилегают к кремнию. Затем селективно удаляют непрореагировавшие остатки металла (рис. 4, *в*). Полицидная область, представляющая собой двухслойное покрытие (силицид, легированный поликристаллический кремний), обеспечивает приемлемую электрическую проводимость. Спейсеры обеспечивают электрическую изоляцию участков силицида на исток-стоковых и затворной областях.

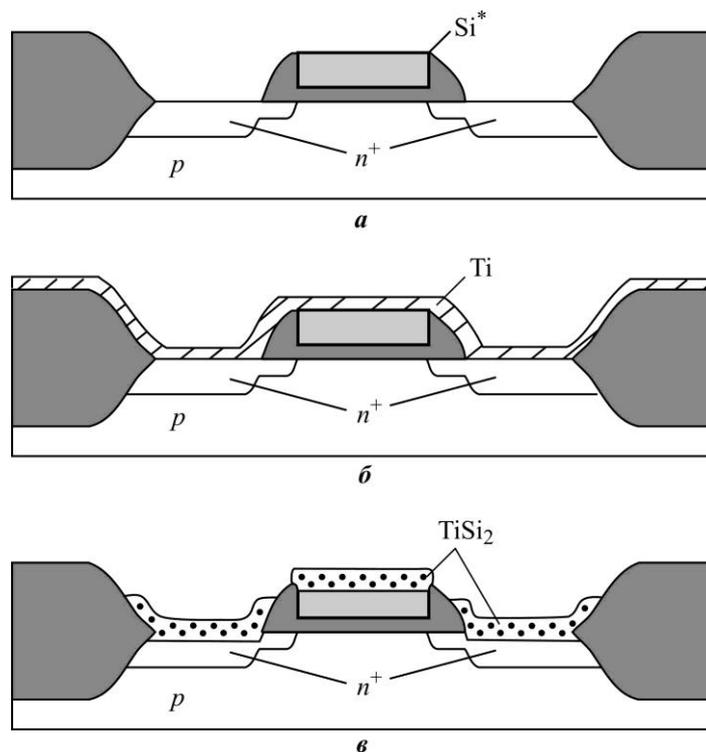


Рис. 4. Последовательность операций технологии Salicide [18]
 Fig. 4. Sequence of operations of the Salicide technology [18]

В качестве материалов силицидных слоев применяют один из трех – $TiSi_2$, $CoSi_2$, $NiSi$ [18]. При субмикронных минимальных размерах активных элементов ИС более 0,18 мкм используют $TiSi_2$, имеющий минимальное удельное объемное сопротивление из всех известных силицидов. При меньших размерах используют $CoSi_2$, а при размерах менее 65 нм – $NiSi$. Применение $CoSi_2$ и $NiSi$ обусловлено прежде всего тем, что при их твердофазном силицидообразовании протекает хемозпитаксиальный процесс, в результате которого образуются монокристаллические слои силицидов. Они характеризуются более качественной границей раздела с кремнием и поликремнием. Отсутствие в них, в отличие от поликристаллических материалов, границ зерен обеспечивает их повышенную устойчивость к взаимному проникновению материала межсоединения и кремния. Переход к $NiSi$ обусловлен меньшим потреблением кремния при формировании слоя силицида (таблица).

Расход кремния при образовании силицидов металлов
Consumption of silicon in the formation of metal silicides

Металл	Силицид	Количество кремния на 1 нм металла, нм	Толщина образованного силицида на 1 нм металла, нм
Ti	$TiSi_2$	2,28	2,60
Hf	$HfSi_2$	1,71	2,12
Co	$CoSi_2$	3,61	3,52
Ni	$NiSi$	1,83	2,36

После формирования силицидного слоя создаются остальные элементы многоуровневой металлизации. В качестве материала межсоединений используется алюминий с примесями $Si^*(1-2\%)$ или $Cu(1-2\%)$. Кремний и медь, концентрируясь на гра-

нице зерен алюминия, затрудняют перемещение ионов металла. Таким образом, повышается электромиграционная стойкость. Алюминий применяется в металлизации ИС с минимальными размерами до 0,13 мкм, медь – в схемах с меньшими размерами. Применение в качестве материала межсоединений меди обусловлено ее более высокой проводимостью. Кроме того, при более высокой температуре плавления медные проводники имеют повышенную электромиграционную стойкость.

На рис. 5 представлена многоуровневая металлизация ИС на примере металлизации с алюминиевыми межсоединениями. На кремниевой подложке со сформированными в ней исток-стоковыми и затворной областями МОП-структуры в соответствии с технологией Salicide создают силицидные контакты к исток-стоковым областям и полицидную затворную область (рис. 5, а, б). На следующей стадии формируют межслойный диэлектрик путем его осаждения и дальнейшей химико-механической полировки (рис. 5, в). Этот этап предшествует фотолитографии, с помощью которой вскрываются контактные окна к силициду и полициду областей стока-истока затвора. Затем применяют метод физического вакуумного осаждения (PVD), конформно формируя тонкий диффузионно-барьерный слой (ДБС), например, из нитрида титана TiN, далее методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) – слой вольфрама (рис. 5, г). Данный метод позволяет беспустотно заполнить протравленные окна в диэлектрике вольфрамом (алюминием беспустотно заполнить затруднительно). Необходимо провести глобальную планаризацию, удаляя материал ДБС с поверхности, в результате чего остаются изолированные проводящие слои вольфрама, находящиеся в окружении ДБС. Осаждением алюминия с легирующими примесями и литографией формируют первый слой металлизации (рис. 5, д), который покрывается межуровневым диэлектриком (рис. 5, е). После первого уровня межслойного диэлектрика осуществляют планаризацию, далее формируют второй уровень. Вскрытие окон в диэлектрике проводят с помощью литографии, методом химического осаждения из газовой фазы осаждают вольфрам, затем формируют второй уровень металлизации из алюминия (рис. 5, ж). Все остальные уровни металлизации имеют аналогичное технологическое решение.

Для технологии Damascene с многоуровневой металлизацией, где материалом межсоединений является медь, первый уровень формируют так же, как и алюминиевой (см. рис. 5, а–г). Различия наблюдаются на следующих этапах. Вопрос создания проводников из меди в отличие от алюминиевых решают путем формирования внутриуровневого слоя диэлектрика с дальнейшей его фотолитографией и травлением. Получившийся рисунок конформно заполняют материалом ДБС, на следующем этапе электрохимически осаждают медь. После данных технологических операций поверхность планаризуется, в результате чего формируются проводящие медные слои, окруженные ДБС. Важный фактор для металлизации на основе меди – формирование ДБС для всех ее слоев. Этот металл в значительной степени диффундирует в активные зоны полупроводников, вызывая их деградацию.

Описанные технологии обеспечивают решение основных проблем многоуровневой металлизации: формирование малопроникающих омических контактов к мелкозалегающим в кремнии легированным областям, планаризация рельефа системы металлизации, обеспечение приемлемой электромиграционной стойкости проводниковых межсоединений.

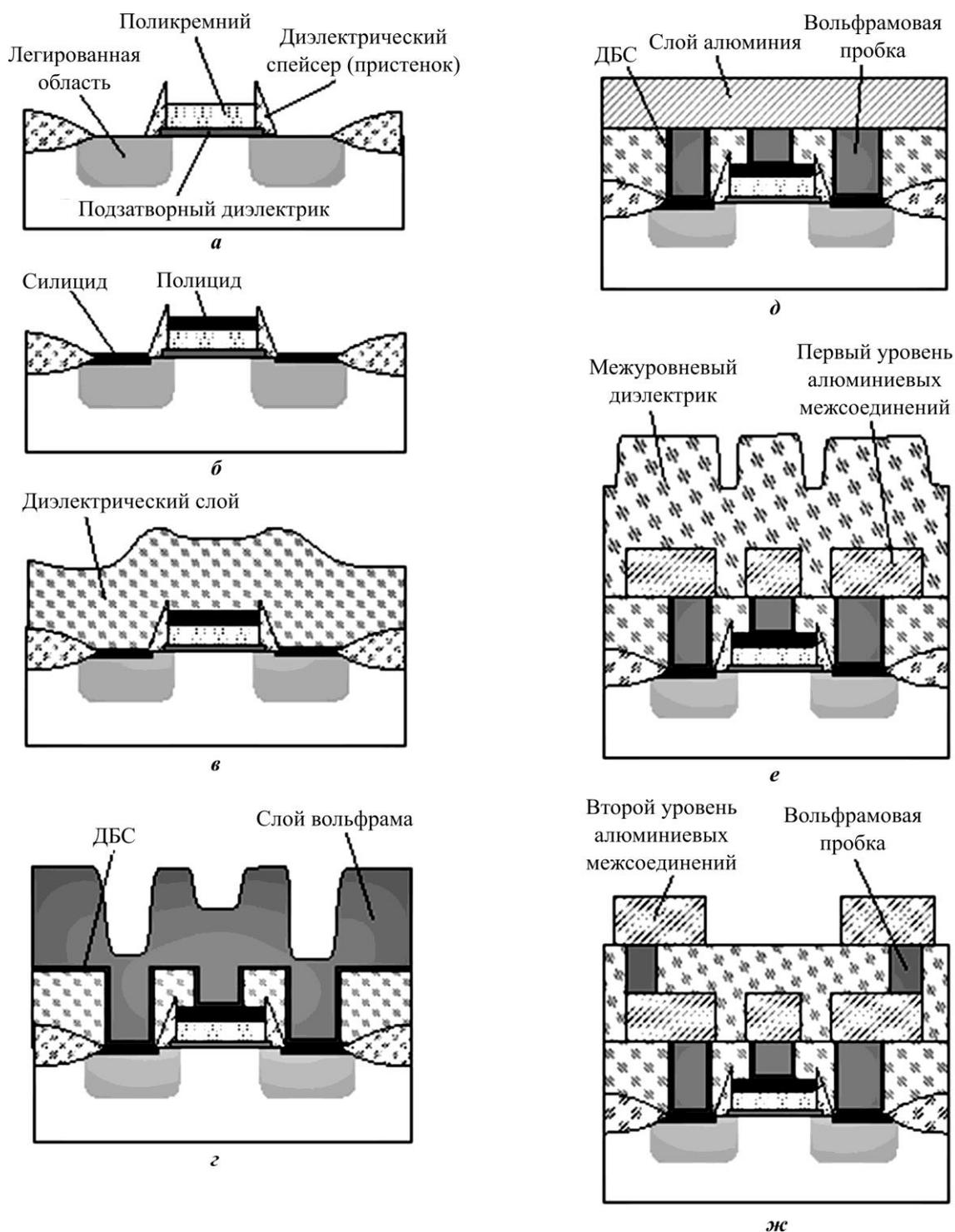


Рис. 5. Схема формирования многоуровневой многослойной системы металлизации с межсоединениями на основе алюминия [18]

Fig. 5. Diagram of the formation of a multilevel multilayer metallization system with aluminum-based interconnects [18]

Вольфрам как материал функциональных слоев ИС. Свойство вольфрама конформно и полностью заполнять углубления с высоким аспектным отношением используют при создании перспективных устройств силовой электроники – транзисторных МДП-структур с вертикальным каналом, характеризующихся повышенным пробивным напряжением. Особенность их конструкции связана с наличием металлических контактов с высоким аспектным отношением к заглубленным в кремнии истоковым, стоковым и затворной областям [1, 19]. Металлические контакты включают в себя диффузионно-барьерный слой, расположенный по периферии в углублениях, и заполняющий углубления слой вольфрама. На рис. 6 приведено поперечное сечение указанной структуры.

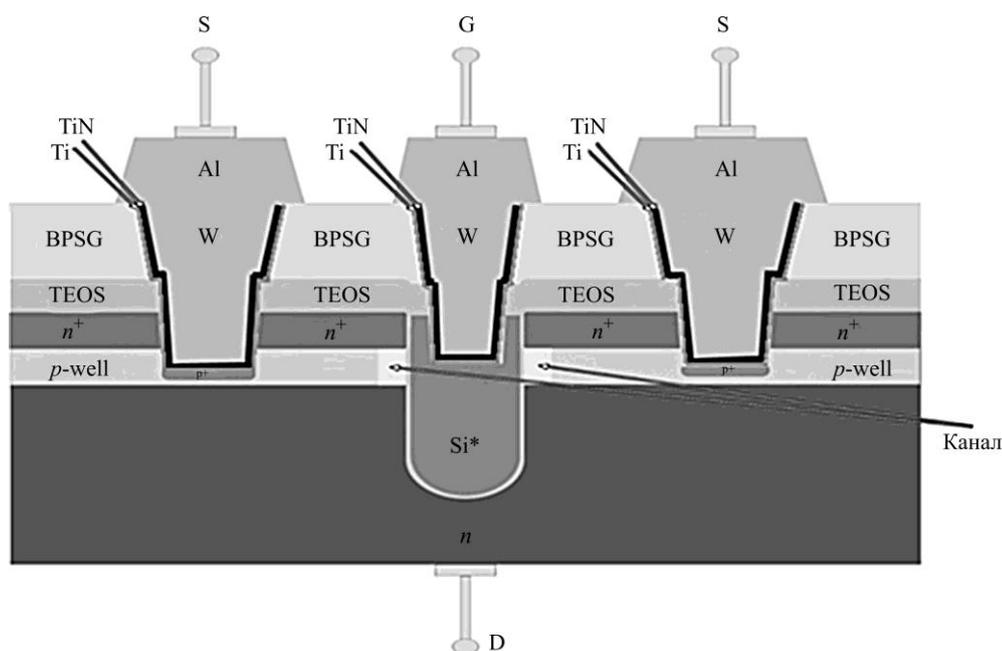


Рис. 6. Поперечное сечение транзисторной МДП-структуры с вертикальным каналом [19]

Fig. 6. Cross section of a MIS transistor structure with a vertical channel [19]

В ИС с минимальными размерами (0,8 мкм и выше) применяют сплав вольфрама с титаном в системе металлизации в качестве слоя диффузионного барьера, обеспечивающего тепловую устойчивость металлизации вплоть до 550 °С [20–22]. Приведем примеры формирования тонких пленок диффузионного барьера на основе сплавов вольфрама [20]. Магнетронным распылением оригинальной мишени, содержащей вольфрам и титан, в среде аргона обеспечивают осаждение тонких пленок двухкомпонентного сплава состава: титан 35–40 ат. %, вольфрам – остальное. Магнетронным распылением в среде аргона оригинальной мишени, содержащей вольфрам, кремний и титан, обеспечивают осаждение тонких пленок трехкомпонентного сплава состава: кремний 0,1–1,3 мас. %, титан 11–33 мас. %, вольфрам – остальное. Данные пленки отличаются повышенной стойкостью к электромиграции [21]. Магнетронным распылением в среде аргона оригинальной мишени, содержащей вольфрам, рений, титан, обеспечивают осаждение тонких пленок трехкомпонентного сплава состава: рений 0,04–9,78 мас. %, титан 2,5–37 мас. %, вольфрам – остальное [22]. Данные пленки характеризуются пониженным уровнем механических напряжений.

Многоуровневая металлизация ИС с межсоединениями на основе вольфрама и его сплавов. Одним из основных требований к материалу межсоединений высокотемпературных кремниевых ИС является повышенная электромиграционная стойкость, которая зависит от многих факторов, в первую очередь от внешней температуры и температуры плавления материала проводников [23]. С ростом температуры процесс электромиграции ионов материала проводников усиливается. Чем выше температура плавления материала проводников, тем выше электромиграционная стойкость. В этой связи используемые в настоящее время в качестве материала межсоединений алюминий и медь не отвечают указанным требованиям. Температура плавления алюминия 650 °С, меди – 1083 °С. Кроме того, при использовании меди активизируется процесс ее миграции через объем диэлектрика к поверхности кремния.

В последнее время исследователи стали проявлять интерес к вольфраму, температура плавления которого выше 3000 °С. Так, немецкие исследователи продемонстрировали создание субмикронных КНИ КМОП-структур для высокотемпературных кремниевых ИС с вольфрамовыми межсоединениями трехуровневой металлизации [3]. На рис. 7 приведено поперечное сечение такой структуры. Отмечено, что транзисторные структуры работоспособны при температуре 200 °С.

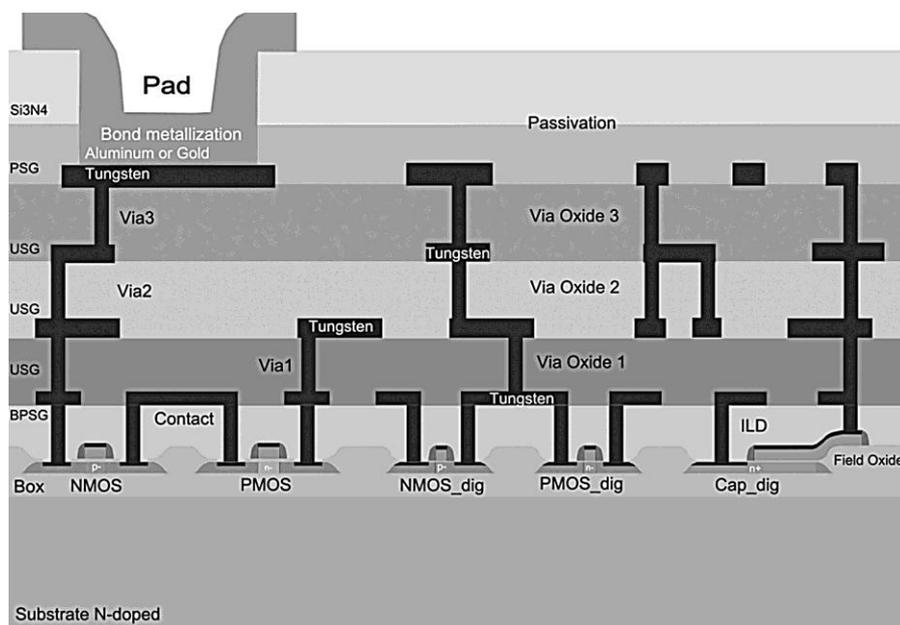


Рис. 7. Поперечное сечение КНИ КМОП-структуры [3]

Fig. 7. Cross section of the CMOS SOI structure [3]

В работе [9] описана технология создания высокотемпературных ИС с многоуровневой металлизацией. Данная технология включает в себя осаждение диэлектрических и проводящих слоев, литографию и травление канавок, нанесение ДБС, формирование зародышевого слоя и химико-механическую планаризацию. Важным отличием от описанных технологических решений является формирование горизонтальных и вертикальных вольфрамовых проводников, полностью окруженных ДБС. Формирование металлизации начинается с осаждения слоя вольфрама на ДБС, затем проводят химико-механическую планаризацию и травление металла для создания канавок, которые заполняются ДБС и диэлектриком. Таким образом, реализуется технология формирования горизонтальных вольфрамовых проводников. Для вертикальных проводников не

обходимы осаждение нового слоя ДБС на лежащем ниже слое вольфрама, а затем, как и для горизонтальных проводников, осаждение металла, его химико-технологическая планаризация, травление и заполнение канавок ДБС и диэлектриком. На рис. 8 приведен пример первого уровня многоуровневой металлизации вольфрама со сформированными вертикальными проводниками.

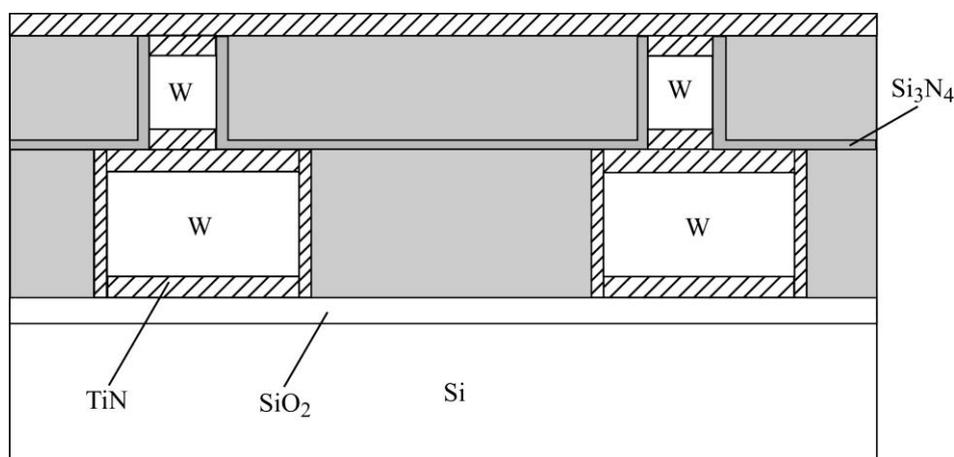


Рис. 8. Поперечное сечение фрагмента многоуровневой системы металлизации высокотемпературных ИС с межсоединениями на основе вольфрама [9]

Fig. 8. Cross section of a fragment of a multilevel metallization system of high-temperature ICs with tungsten-based interconnects [9]

В работе [13] рассмотрена трехуровневая металлизация. В качестве проводников применяли алюминий, титан, нитрид титана и вольфрам. Вольфрам осаждали из газовой фазы (PVD). Подбор технологических режимов операции направлен на увеличение конформности заполнения переходных отверстий и снижение внутренних механических напряжений в слоях металла.

В работе [24] исследованы высоковольтные LDMOS-транзисторы. Данные устройства созданы по КНИ-технологии совместно с низковольтными КМОП-схемами. Вольфрам применяли в качестве межсоединений. Проведены исследования при температурах от -60 до $+300$ °С и в условиях ионизирующего излучения. Отмечена стабильная работа LDMOS-транзисторов в экстремальных внешних условиях.

Однако вольфрам имеет существенный недостаток, связанный с его механическими свойствами. Это очень твердый, но хрупкий материал. Кроме того, из-за разных коэффициентов температурного расширения вольфрама и кремния система тонкая вольфрамовая пленка – кремний, покрытый оксидом кремния, характеризуется значительным уровнем встроенных механических напряжений. У тонких пленок вольфрама невысокая адгезионная способность к кремнию и оксиду кремния, что снижает эффективность их использования для создания межсоединений в металлизации ИС.

Изменение пластичности вольфрама за счет включения в его состав рения называется рениевым эффектом (впервые обнаружен в 1955 г. английскими учеными), сущность которого до сих пор недостаточно изучена. Согласно работе [25] очищение вольфрама не решает проблему наличия в нем углерода, который, имея низкое значение растворимости в тугоплавком металле, является негативной примесью, снижая пластичность пленок. Он занимает межзерновые границы в карбидных фазах. При добавлении рения в состав вольфрама углерод удаляется с границ зерен, что и изменяет

механические свойства данного тугоплавкого металла. Но никаких экспериментальных подтверждений данного положения не представлено.

В работе [12] проведено исследование легирования вольфрама рением (5 %) на свойства тонких пленок. На рис. 9 показано распределение механических напряжений в структурах вольфрам – кремний и легированный рением вольфрам – кремний. На рис. 10 приведены результаты испытаний на отказ при высокотемпературных режимах.

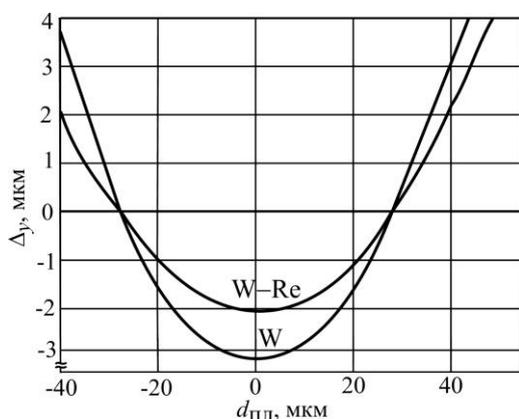


Рис. 9. Распределение механических напряжений в латеральном направлении в структурах W-Si и W(Re)-Si [12]

Fig. 9. Mechanical stress distributions in the lateral direction in the W-Si and W(Re)-Si structures [12]

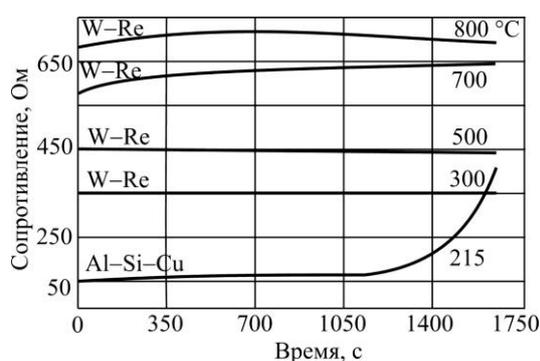


Рис. 10. Зависимость сопротивления проводников от времени при ускоренных испытаниях при различных температурах [12]

Fig. 10. Dependence of the resistance of conductors on time during accelerated tests at different temperatures [12]

Полученные результаты подтверждают, что легирование тонких пленок вольфрама рением снижает уровень механических напряжений. Установлено значительное повышение электромиграционной стойкости пленок вольфрама по сравнению с медными и алюминиевыми и повышение адгезионных свойств. Усилие на отрыв пленки вольфрама с рением превосходит аналогичный параметр для пленки чистого вольфрама в три раза.

В работе [26] исследован процесс взаимодействия компонентов бинарных сплавов, осажденных на подложку. Сделано предположение, что один из компонентов может диффундировать с границ зерен в объем зерен или в подложку. Связано это с энергией сублимации различных элементов, составляющих сплав. Данный эффект наблюдается у компонента с большей энергией. Такое влияние можно обнаружить и в тонких пленках вольфрама. Углерод может быть вытеснен с границ зерен в их объем с повышением его предельной растворимости в тугоплавком металле.

В работах [1, 7] рассмотрено осаждение аналогичных рению материалов исходя из показателей энергии сублимации. Обнаружены титан и азот в качестве легирующей примеси. Достигнуты удовлетворительные показатели усилия на отрыв, а также электромиграционной стойкости, что свидетельствует о снижении уровня встроенных механических напряжений.

Заключение. Результаты анализа литературных источников позволяют констатировать перспективность применения вольфрама в качестве материала межсоединений и металлизации в целом для высокотемпературных ИС.

Добавление рения в вольфрам обеспечивает получение пластичных проводниковых межсоединений, характеризующихся удовлетворительной адгезионной способностью. Аналогичный рению эффект имеют титан и азот. Они также снижают механические напряжения в пленках вольфрама и повышают их адгезионную способность.

Литература

1. **Timakov A. V., Shevyakov V. I.** Investigation of the electrophysical and mechanical properties of metal-lization based on alloys W with Re, Ti, N for high-temperature silicon VLSI // Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics. 2022. Vol. 12157. Art. ID: 1215719. <https://doi.org/10.1117/12.2624348>
2. Пат. 2775446 РФ. Способ получения тонких металлических пленок на основе вольфрама / **В. С. Горностай-Польский, А. В. Тимаков, В. И. Шевяков**; заявл. 21.12.2022; опубл. 30.06.2022, Бюл. № 19. 7 с.
3. High-temperature ICs // Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS [Электронный ресурс]. URL: https://www.ims.fraunhofer.de/en/search.html?_charset=UTF-8&numberResults=10&page=1&scope=IMS&language=en&lang=en&queryString=High-Temperature+ICs (дата обращения: 20.08.2022).
4. High temperature SOI CMOS technology (H035) // Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS [Электронный ресурс]. URL: https://www.ims.fraunhofer.de/en/Business_Units_and_Core_Compencies/High-Temperature-Electronics/Technologies/HT-SOI-CMOS.html (дата обращения: 10.08.2022).
5. Effect of film deposition rate on the thermoelectric output of tungsten-rhenium thin film thermocouples by DC magnetron sputtering / **B. Tian, Z. Liu, Z. Zhang et al.** // J. Micromech. Microeng. 2020. Vol. 30. No. 6. Art. No. 065004. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab8607>
6. Influence of thickness and sputtering pressure on electrical resistivity and elastic wave propagation in oriented columnar tungsten thin films / **A. Chargui, R. El Beainou, A. Mosset et al.** // Nanomaterials. 2020. Vol. 10. Iss. 1. Art. No. 81. <https://doi.org/10.3390/nano10010081>
7. **Белов А. Н., Голишников А. А., Костюков Д. А., Шевяков В. И.** Металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе сплава вольфрама с титаном // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 1. С. 22–29. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-1-22-29>
8. Effect of heat treatment on thermoelectric properties of tungsten-rhenium thin-film thermocouples by RF magnetron sputtering / **Z. Zhang, B. Tian, Z. Du et al.** // AIP Advances. 2018. Vol. 8. Iss. 12. Art. No. 125113. <https://doi.org/10.1063/1.5074126>
9. Пат. 2611098 РФ. Способ формирования системы многоуровневой металлизации на основе вольфрама для высокотемпературных интегральных микросхем / **А. С. Бенедиктов, П. В. Игнатов, В. А. Гвоздев**; заявл. 09.12.2015; опубл. 21.02.2017, Бюл. № 6. 10 с.
10. Measurement study of residual stress on tungsten-rhenium thin film thermocouples by nanoindentation technology / **B. Tian, Q. Yu, Z. Zhang et al.** // 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). Los Angeles, CA: IEEE, 2017. P. 800–803. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2017.8017139>
11. **Choi D., Barmak K.** On the potential of tungsten as next-generation semiconductor interconnects // Electron. Mater. Lett. 2017. Vol. 13. Iss. 5. P. 449–456. <https://doi.org/10.1007/s13391-017-1610-5>
12. Tungsten alloyed with rhenium as an advanced material for heat-resistant silicon ICs interconnects / **A. N. Belov, Yu. A. Chaplygin, A. A. Golishnikov et al.** // Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics. 2016. Vol. 10224. Art. ID: 1022404. <https://doi.org/10.1117/12.2264789>
13. Многоуровневая металлизация для высокотемпературной микроэлектроники / **С. И. Бабкин, С. И. Волков, К. С. Есенкин и др.** // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2016. № 2 (241). С. 33–44.
14. **Watson J., Castro G.** A review of high-temperature electronics technology and applications // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2015. Vol. 26. Iss. 12. P. 9226–9235. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3459-4>
15. **Watson J., Castro G.** High-temperature electronics pose design and reliability challenges // Analog Dialogue. 2012. Vol. 46 (2). P. 3–9.
16. **Старосельский В. И.** Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники. М.: Юрайт: Высшее образование, 2009. 463 с.
17. **Shoucair F. S.** Potential and problems of high-temperature electronics and CMOS integrated circuits (25–250 °C) – an overview // Microelectronics Journal. 1991. Vol. 22. Iss. 2. P. 39–54. [https://doi.org/10.1016/0026-2692\(91\)90024-H](https://doi.org/10.1016/0026-2692(91)90024-H)
18. **Громов Д. Г., Мочалов А. И., Сулимин А. Д., Шевяков В. И.** Металлизация ультрабольших интегральных схем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 277 с.
19. **Горностай-Польский В. С., Шевяков В. И.** Исследование влияния плазменной обработки на свойства сформированных химическим осаждением из газовой фазы тонких пленок нитрида титана // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 6. С. 715–722. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-715-722>

20. Пат. 2352684 РФ. Вольфрам-титановая мишень для магнетронного распыления и способ ее получения / **В. Г. Глебовский, Е. Д. Штинов, О. С. Кочетов**; заявл. 03.08.2007; опубл. 20.04.2009, Бюл. № 11. 8 с.
21. Пат. 2454481 РФ. Способ получения составной мишени для распыления из сплава вольфрам – титан – кремний / **В. Г. Глебовский**; заявл. 03.06.2010; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18. 6 с.
22. Пат. 2454482 РФ. Способ получения составной мишени для распыления из сплава вольфрам – титан – рений / **В. Г. Глебовский**; заявл. 03.06.2010; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18. 6 с.
23. **Safonov S. O., Vespalov V. P., Golishnikov A. A., Putrya M. G.** Estimating the reliability of aluminum metallization of integrated circuits by accelerated electromigration testing at constant temperature // *Russ. Microelectron.* 2015. Vol. 44. Iss. 7. P. 453–459. <https://doi.org/10.1134/S1063739715070148>
24. Высоковольтные LDMOS транзисторы на КНИ структуре для экстремальной электроники / **С. И. Бабкин, С. И. Волков, А. А. Глушко и др.** // *Микроэлектроника.* 2020. Т. 49. № 4. С. 304–313. <https://doi.org/10.31857/S0544126920030023>
25. Сплавы тугоплавких металлов. URL: https://studref.com/350287/tehnika/splavy_tugoplavkih_metallov (дата обращения: 20.09.2022).
26. **Gromov D. G., Mochalov A. I., Pugachevich V. P., Sorokin I. N.** Interaction between binary alloy thin films and silicon substrate: The conditions of bilayer formation and the effect of additional component // *Appl. Phys. A.* 2000. Vol. 70. P. 333–340. <https://doi.org/10.1007/s003390050056>

Обзор поступил в редакцию 04.10.2022 г.; одобрен после рецензирования 27.12.2022 г.;
принят к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Тимаков Алексей Валерьевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aletimakov@yandex.ru

Горностай-Польский Вадим Станиславович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vad00711@gmail.com

Шевяков Василий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), shev@dtd.miee.ru

References

1. Timakov A. V., Shevyakov V. I. Investigation of the electrophysical and mechanical properties of metalization based on alloys W with Re, Ti, N for high-temperature silicon VLSI. *Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics*, 2022, vol. 12157, art. ID: 1215719. <https://doi.org/10.1117/12.2624348>
2. Gornostaj-Polskij V. S., Timakov A. V., Shevyakov V. I. *Method for obtaining thin metal films based on tungsten*. Patent 2775446 RF, publ. 30.06.2022, Bul. No. 19. 7 p. (In Russian).
3. High-temperature ICs. *Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS*. Available at: https://www.ims.fraunhofer.de/en/search.html?_charset_=UTF-8&numberResults=10&page=1&scope=IMS&language=en&lang=en&queryString=High-Temperature+ICs (accessed: 20.08.2022).
4. High temperature SOI CMOS technology (H035). *Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS*. Available at: https://www.ims.fraunhofer.de/en/Business_Units_and_Core_Competencies/High-Temperature-Electronics/Technologies/HT-SOI-CMOS.html (accessed: 10.08.2022).
5. Tian B., Liu Z., Zhang Z., Liu Y., Lin Q., Peng S., Jiang Z. Effect of film deposition rate on the thermoelectric output of tungsten-rhenium thin film thermocouples by DC magnetron sputtering. *J. Micromech. Microeng.*, 2020, vol. 30, no. 6, art. no. 065004. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab8607>
6. Chargui A., El Beainou R., Mosset A., Euphrasie S., Potin V., Vairac P., Martin N. Influence of thickness and sputtering pressure on electrical resistivity and elastic wave propagation in oriented columnar tungsten thin films. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, iss. 1, art. no. 81. <https://doi.org/10.3390/nano10010081>

7. Belov A. N., Golishnikov A. A., Kostyukov D. A., Shevyakov V. I. Metallization of high-temperature silicon ICs based on tungsten titanium alloy. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 22–29. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-1-22-29>
8. Zhang Z., Tian B., Du Z., Lin Q., Shi P., Ren W., Zhao N., Jiang Z. Effect of heat treatment on thermoelectric properties of tungsten-rhenium thin film thermocouples by RF magnetron sputtering. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, iss. 12, art. no. 125113. <https://doi.org/10.1063/1.5074126>
9. Benediktov A. S., Ignatov P. V., Gvozdev V. A. *Method of formation of multilevel metallization system based on tungsten for high-integrated circuits*. Patent 2611098 RF, publ. 21.02.2017, Bul. No. 6. 10 p. (In Russian).
10. Tian B., Yu Q., Zhang Z., Lin Q., Zhao N., Jing W., Jiang Z. Measurement study of residual stress on tungsten-rhenium thin film thermocouples by nanoindentation technology. *2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*. Los Angeles, CA, IEEE, 2017, pp. 800–803. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2017.8017139>
11. Choi D., Barmak K. On the potential of tungsten as next-generation semiconductor interconnects. *Electron. Mater. Lett.*, 2017, vol. 13, iss. 5, pp. 449–456. <https://doi.org/10.1007/s13391-017-1610-5>
12. Belov A. N., Chaplygin Yu. A., Golishnikov A. A., Kostyukov D. A., Putrya M. G., Safonov S. O., Shevyakov V. I. Tungsten alloyed with rhenium as an advanced material for heat-resistant silicon ICs interconnects. *Proc. SPIE. International Conference on Micro- and Nano-Electronics*, 2016, vol. 10224. art. ID: 1022404. <https://doi.org/10.1117/12.2264789>
13. Babkin S. I., Volkov S. I., Esenkin K. S., Novoselov A. S., Stolyarov A. A. Multilevel metallization for high temperature microelectronics. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovyye pribory = Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2016, no. 2 (241), pp. 33–44. (In Russian).
14. Watson J., Castro G. A review of high-temperature electronics technology and applications. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2015, vol. 26, iss. 12, pp. 9226–9235. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3459-4>
15. Watson J., Castro G. High-temperature electronics pose design and reliability challenges. *Analog Dialogue*, 2012, vol. 46 (2), pp. 3–9.
16. Starosel'skiy V. I. *Physics of microelectronics semiconductor devices*. Moscow, Yurayt Publ., Vyssheye obrazovaniye Publ., 2009. 463 p. (In Russian).
17. Shoucair F. S. Potential and problems of high-temperature electronics and CMOS integrated circuits (25–250 °C) – an overview. *Microelectronics Journal*, 1991, vol. 22, iss. 2, pp. 39–54. [https://doi.org/10.1016/0026-2692\(91\)90024-H](https://doi.org/10.1016/0026-2692(91)90024-H)
18. Gromov D. G., Mochalov A. I., Sulimin A. D., Shevyakov V. I. *Metallization of ultralarge-scale ICs*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ. 2009. 277 p. (In Russian).
19. Gornostay-Polsky V. S., Shevyakov V. I. Investigation of the effect of plasma treatment on the properties of titanium nitride thin films formed by chemical vapor deposition. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 6, pp. 715–722. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-6-715-722>
20. Glebovskij V. G., Shtinov E. D., Kochetov O. S. *Tungsten-titanic target for magnetron sputtering and method of its receiving*. Patent 2352684 RF, publ. 20.04.2009, Bul. No. 11. 8 p. (In Russian).
21. Glebovskij V. G. *Method for obtaining composite target for sputtering from tungsten – titanium – silicon alloy*. Patent 2454481 RF, publ. 27.06.2012, Bul. No. 18. 6 p. (In Russian).
22. Glebovskij V. G. *Method for obtaining composite target for sputtering from tungsten – titanium – rhenium alloy*. Patent 2454482 RF, publ. 27.06.2012, Bul. No. 18. 6 p. (In Russian).
23. Safonov S. O., Bepalov V. P., Golishnikov A. A., Putrya M. G. Estimating the reliability of aluminum metallization of integrated circuits by accelerated electromigration testing at constant temperature. *Russ. Microelectron.*, 2015, vol. 44, iss. 7, pp. 453–459. <https://doi.org/10.1134/S1063739715070148>
24. Babkin S. I., Volkov S. I., Glushko A. A., Morozov S. A., Novoselov A. S., Stolyarov A. A. High-voltage LDMOS transistors on an SOI structure for electronics that operate in extreme conditions. *Russ. Microelectron.*, 2020, vol. 49, iss. 4, pp. 285–294. <https://doi.org/10.1134/S1063739720030026>
25. Alloys of refractory metals. URL: https://studref.com/350287/tehnika/splavy_tugoplavkih_metallov (accessed: 20.09.2022).
26. Gromov D. G., Mochalov A. I., Pugachevich V. G., Sorokin I. N. Interaction between binary alloy thin films and silicon substrate: The conditions of bilayer formation and the effect of additional component. *Appl. Phys. A*, 2000, vol. 70, pp. 333–340. <https://doi.org/10.1007/s003390050056>

The review was submitted 04.10.2022; approved after reviewing 27.12.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Aleksey V. Timakov – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aletimakov@yandex.ru

Vadim S. Gornostay-Polsky – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vad00711@gmail.com

Vasily I. Shevyakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the of Integrated Electronics and Microsystems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), shev@dsd.miee.ru

Внимание читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

**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

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья

УДК 621.3.049.774:621.382.3:538.91

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-2-180-188

Исследование влияния плавающего кармана на характеристики КНИ КМОП-транзисторов

А. В. Кириллова^{1,2}, М. А. Королёв¹

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

²АО «Научно-исследовательский институт молекулярной
электроники», г. Москва, Россия

akirillova@niime.ru

Аннотация. Микросхемы на основе КНИ КМОП-транзисторов характеризуются высокой производительностью, увеличенной радиационной стойкостью, возможностью работы при повышенных температурах. Однако у таких ИС возникает отрицательный эффект – плавающий карман, существенно влияющий на параметры схемы, в частности на стабильность работы, подвижность носителей в канале, пороговое напряжение, ток утечки, и приводящий к возникновению паразитного биполярного транзистора и кинк-эффекта. В работе исследовано влияние плавающего кармана на характеристики КНИ КМОП-транзисторов с разными геометрическими параметрами. Проведена экстракция Spice-параметров приборов, на основе которых создана компактная модель КНИ КМОП-транзистора и проверена ее достоверность. С помощью разработанной модели выполнено компактное моделирование КНИ КМОП-транзисторов и определены закономерности влияния длины и ширины канала, а также потенциала кармана на пороговое напряжение и возникновение кинк-эффекта. Установлено, что паразитные эффекты плавающего кармана оказывают критическое влияние на основные характеристики КНИ КМОП-транзисторов. Расчетные и экспериментальные исследования показали существенное влияние геометрических параметров транзистора и потенциала плавающего кармана на пороговое напряжение и возникновение кинк-эффекта, что ограничивает возможность уменьшения размеров элементов КНИ КМОП СБИС.

Ключевые слова: КНИ КМОП-транзистор, компактная модель, компактное моделирование, плавающий карман, паразитные эффекты, ВАХ, пороговое напряжение, паразитный биполярный транзистор, кинк-эффект, ударная ионизация

Для цитирования: Кириллова А. В., Королёв М. А. Исследование влияния плавающего кармана на характеристики КНИ КМОП-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 180–188. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-180-188>

Original article

Research of the influence of floating body effects on SOI MOSFETs

A. V. Kirillova^{1,2}, M. A. Korolev¹

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²“Research Institute of Molecular Electronics” JSC, Moscow, Russia

akirillova@niime.ru

Abstract. The devices based on SOI CMOS transistors are characterized by high performance, increased radiation resistance, and the ability to operate at elevated temperatures. However, such devices have a negative effect – a floating body. It significantly affects the parameters of the device, in particular the stability of operation, the mobility of carriers in the channel, the threshold voltage, the leakage current, and leads to the appearance of a parasitic bipolar transistor and a kink effect. In this work, the influence of floating body effects on the characteristics of SOI CMOS transistors is researched for various design options of the device. The SPICE parameters of the device were extracted, based on this a compact model of SOI CMOS transistor was created and its reliability checked. Using the developed model, a compact simulation of SOI CMOS transistor was carried out and regularities of the influence of the channel length and width, as well as the value of floating body potential, on the threshold voltage and the occurrence of the kink effect were determined. It has been established that the parasitic effects of the floating body critically affect the main characteristics of the device. Calculation and experimental studies have shown a significant effect of the geometric parameters of the transistor and the floating body potential on the threshold voltage and the occurrence of the kink effect, which limits the possibility of reducing the size of SOI CMOS VLSI elements.

Keywords: SOI MOSFET, compact model, compact simulation, floating body, parasitic effects, IV, threshold voltage, parasitic bipolar transistor, kink effect, impact ionization

For citation: Kirillova A. V., Korolev M. A. Research of the influence of floating body effects on SOI MOSFETs. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 180–188. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-180-188>

Введение. КНИ КМОП-транзисторы входят в состав высокопроизводительных ИС и характеризуются улучшенным подпороговым наклоном и уменьшенной емкостью перехода [1]. Однако в КНИ КМОП-транзисторах с толщиной кремниевой пленки более 30 нм в условиях частичного обеднения появляется эффект плавающего кармана [2]. Появление плавающего кармана связано с тем, что в области пространственного заряда стокового p – n -перехода под влиянием сильных электрических полей возникает ударная ионизация с образованием электронно-дырочных пар. В случае объемной структуры МОП-транзистора электроны инжектируются в подзатворный диэлектрик

или сток, а дырки уходят в подложку. При использовании КНИ-структуры, когда транзистор расположен в полностью изолированном диэлектриком участке пленки кремния (кармане), происходит накопление в нем дырок, что приводит к появлению неопределенного (плавающего) потенциала кармана [3–5]. Такой заряд не может быть удален достаточно быстро в первую очередь из-за отсутствия контакта с карманом.

Экспериментальные исследования влияния эффекта плавающего кармана на характеристики КНИ КМОП-транзисторов затруднительны, поэтому целесообразно исследования в данном направлении проводить методами математического моделирования, создав достаточно точную компактную модель такого прибора.

В настоящей работе приводятся результаты моделирования двух типов транзисторов: в первом случае контакт с карманом остается свободным (плавающим), во втором – к контакту приложено различное напряжение. Получена полная картина процесса появления эффекта плавающего кармана, а также влияния геометрических параметров КНИ КМОП-транзисторов и потенциала в области кармана на работу прибора.

Моделирование и экстракция. В качестве объекта исследования использовали тестовые структуры частично обедненных КНИ КМОП-транзисторов, выполненных по 180-нм технологии. Конструктивно-технологические параметры транзисторов следующие: поликремниевый затвор с концентрацией примеси $N_G = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, толщина подзатворного и скрытого оксида $T_{fox} = 3,2 \text{ нм}$, $T_{box} = 150 \text{ нм}$ соответственно, толщина кремниевой пленки составляет $T_{Si} = 100 \text{ нм}$ с концентрацией примеси в ней $N_{sub} = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Геометрические параметры изменяются в диапазоне значений длины канала $L = 0,18...10 \text{ мкм}$ и ширины канала $W = 0,52...10 \text{ мкм}$. Исследуются пороговое напряжение U_{th0} и наличие кинк-эффекта.

Точность разработанной компактной модели достигнута в результате внесенных изменений в процессе ее создания, так как в ходе эксперимента обнаружен нестандартный вид зависимости порогового напряжения и тока стока от изменения геометрических параметров КНИ КМОП-транзисторов. Такие изменения в базовых характеристиках прибора невозможно описать стандартной моделью BSIMSOI. Поэтому введены добавочные коэффициенты с эмпирически подобранными параметрами. С помощью экспоненциальной зависимости удалось добиться среднеквадратичной ошибки, не превышающей 0,5 % для базовых характеристик (порогового напряжения и тока насыщения).

Уравнение зависимости порогового напряжения U_{th0} от длины L и ширины W канала имеет вид

$$U_{th0} = U_{th0} + (ae^{-bL} + ce^{-fL}) + (ke^{-hW} + me^{-nW}), \quad (1)$$

где U_{th0} – параметр, который рассчитывается в теле компактной модели; $a = 13,16 \cdot 10^{-3}$; $b = -114,2 \cdot 10^{-3}$; $c = 57,9 \cdot 10^3$; $f = 1,8 \cdot 10^6$; $k = 10 \cdot 10^{-2}$; $h = 10 \cdot 10^{12}$; $m = 10 \cdot 10^{-2}$; $n = 10 \cdot 10^6$ – эмпирически подобранные добавочные коэффициенты для длины и ширины соответственно.

Для корректировки токовой характеристики использовали уравнение зависимости эффективной подвижности μ_0 от длины L и ширины W канала, так как ток стока имеет прямую зависимость от подвижности основных носителей заряда:

$$\mu_0 = \mu_0 + (a_{par} e^{b_{par}L} + c_{par} e^{f_{par}L}) + (k_{par} e^{h_{par}W} + m_{par} e^{n_{par}W}), \quad (2)$$

где μ_0 – параметр, который рассчитывается в теле компактной модели; $a_{par} = -11,6 \cdot 10^{-3}$; $b_{par} = 10,53 \cdot 10^{-3}$; $c_{par} = 199,6 \cdot 10^3$; $f_{par} = 739,6 \cdot 10^3$; $k_{par} = -91,32 \cdot 10^{-3}$; $h_{par} = 1,44$; $m_{par} = 38 \cdot 10^3$; $n_{par} = 3,9 \cdot 10^6$ – эмпирически подобранные добавочные коэффициенты для длины и ширины соответственно.

В результате проведения процесса экстракции параметров создана компактная Spice-модель, которая разработана на основе распространенной модели BSIMSOIv4.5 и описывает большинство паразитных эффектов [6, 7]. Общая среднеквадратичная ошибка полученной модели составила 8,5 %. Пример сходимости модели показан на рис. 1.

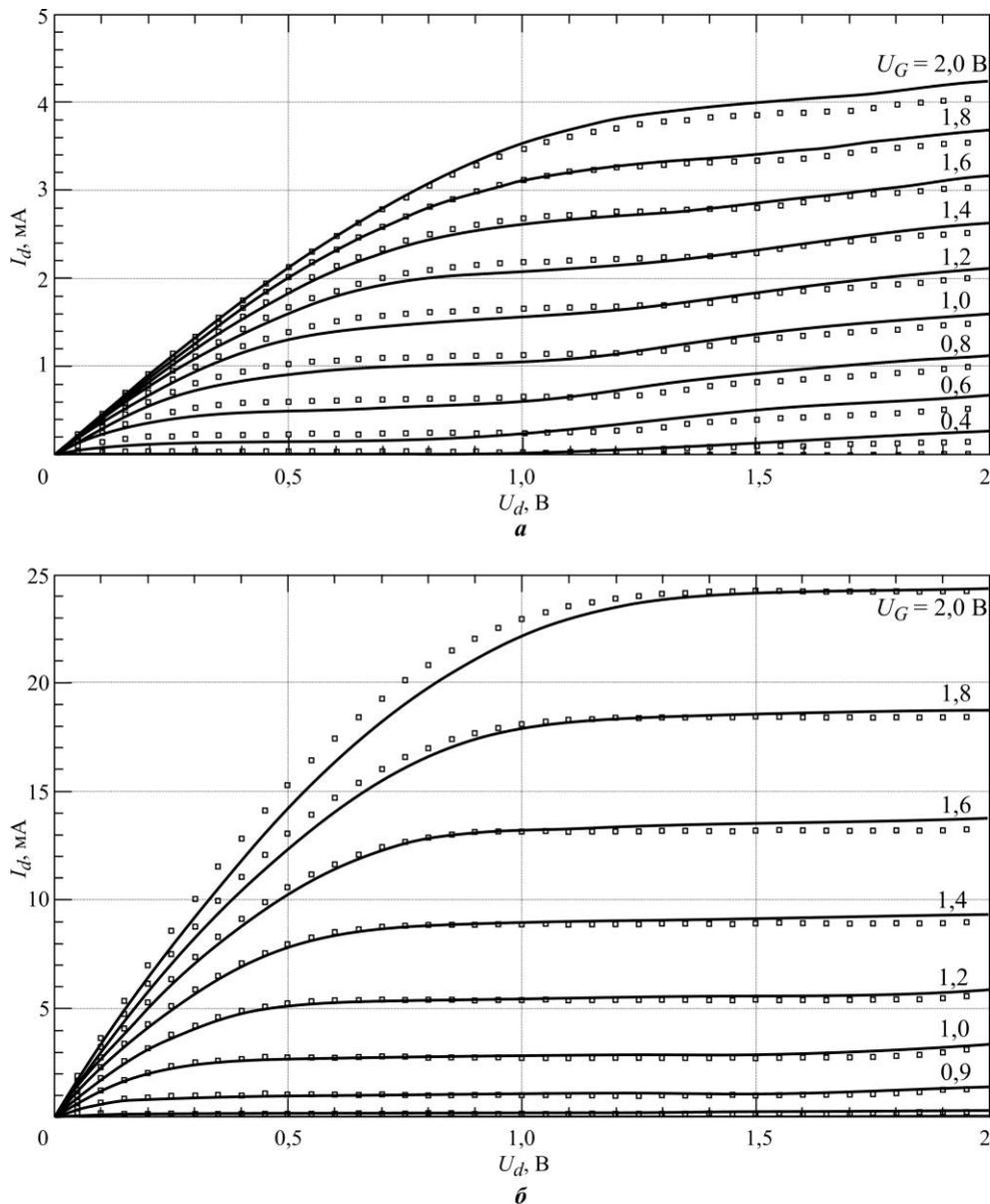


Рис. 1. Пример сходимости ВАХ для КНИ КМОП-транзисторов с плавающим (а) и фиксированным (б) карманом: точки – эксперимент; сплошные линии – расчет
 Fig. 1. Example of I–U characteristics for SOI CMOSFET with floating (a) and fixed (b) body: points – experimental data; solid line – calculated

Исследование зависимости порогового напряжения КНИ КМОП-транзистора от плавающего потенциала кармана при различной геометрии канала. В случае частично обедненного КНИ КМОП-транзистора пороговое напряжение подвержено эффекту плавающего кармана [8]. В рабочем теле транзистора в результате накопления дырок, возникающих вследствие ударной ионизации в области пространственного заряда стока, образуется паразитный биполярный транзистор (рис. 2).

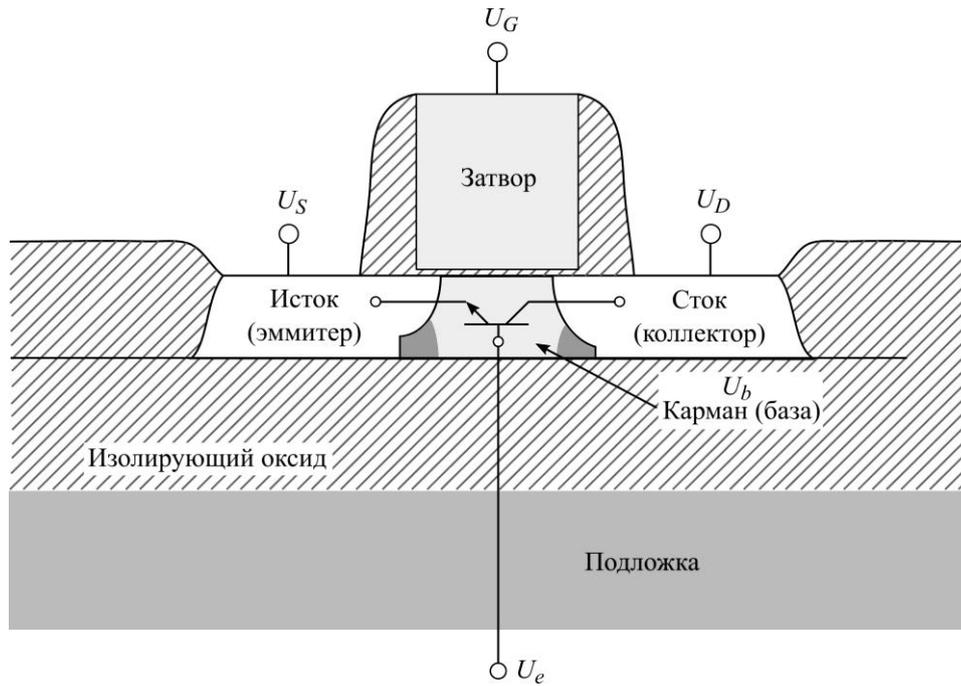


Рис. 2. Структура частично обедненного КНИ КМОП-транзистора с паразитным биполярным транзистором в области кармана
 Fig. 2. Structure of the PD SOI CMOSFET with a parasitic bipolar transistor in the body area

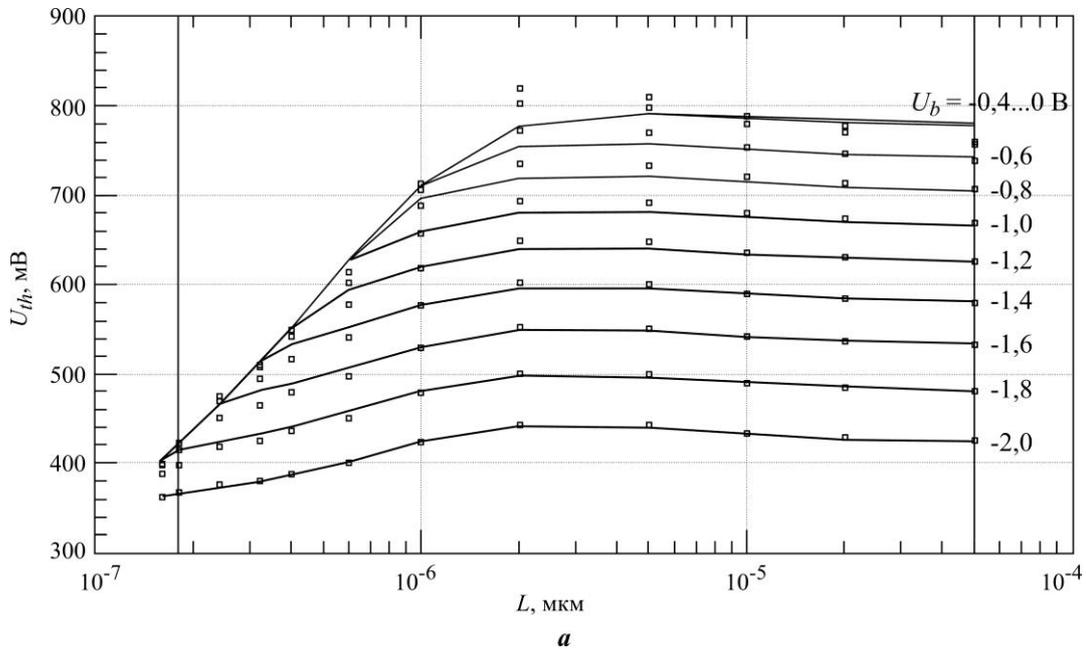


Рис. 3. Зависимости порогового напряжения от длины L канала транзистора при смещении на кармане U_b от 0 до -2 В для транзисторов с шириной канала $W = 10$ мкм (а): точки – эксперимент; сплошные линии – расчет

Fig. 3. Dependences of the threshold voltage on the transistor channel length L at U_b (body bias) from zero to -2 V, with $W = 10$ μm (a): points – experimental data; solid line – calculated

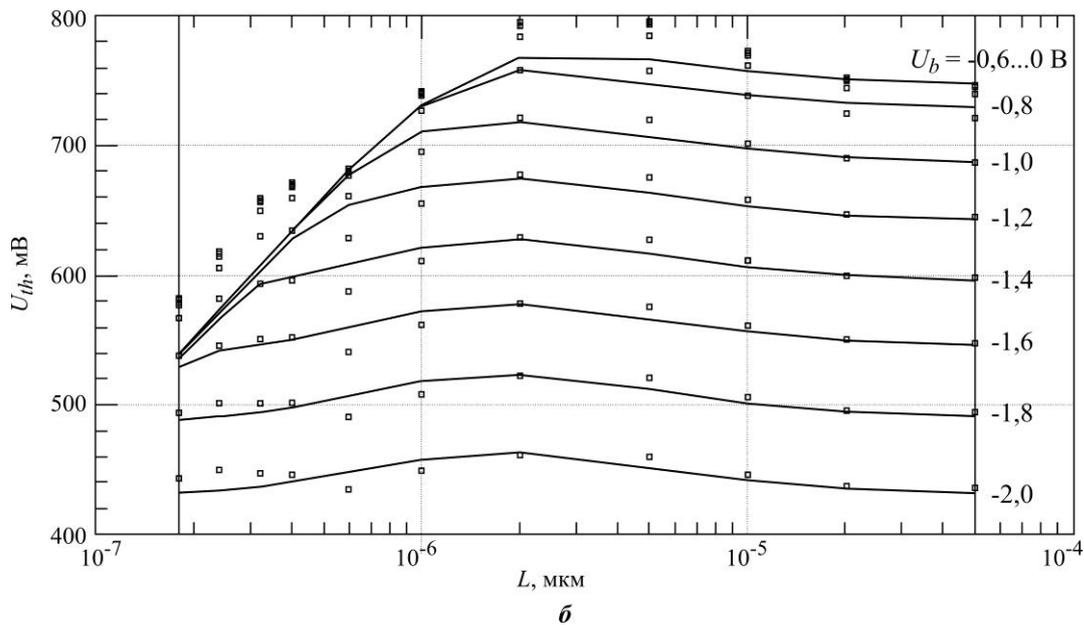


Рис. 3. Зависимости порогового напряжения от длины L канала транзистора при смещении на кармане U_b от 0 до -2 В для транзисторов с шириной канала $W = 0,52$ мкм (δ): точки – эксперимент; сплошные линии – расчет

Fig. 3. Dependences of the threshold voltage on the transistor channel length L at U_b (body bias) from zero to -2 V, with $W = 0.52$ μm (δ): points – experimental data; solid line – calculated

В результате накопления дырок на границе перехода сток – карман происходит увеличение разности потенциалов база – эмиттер биполярного транзистора и возникает ток через базу, что снижает пороговое напряжение [6, 7]. Данное явление зависит от приложенного смещения в области кармана при разной длине и ширине канала КНИ КМОП-транзистора (рис. 3). В случае транзистора с большой шириной канала при изменении потенциала кармана происходит более крутое снижение порогового напряжения, что можно объяснить увеличением тока через базу паразитного биполярного транзистора вследствие возрастания площади эмиттера [8]. Данная зависимость подтверждается сопоставлением смоделированных данных с экспериментальными. Для обеспечения условия электронейтральности в результате увеличения заряда дырок увеличивается заряд электронов в инверсном канале, что приводит к увеличению тока насыщения и, как следствие, к снижению порогового напряжения.

Исследование зависимости возникновения кинк-эффекта от геометрических параметров КНИ КМОП-транзистора. Результаты исследования показывают, что для КНИ КМОП-транзистора при определенных воздействиях характерно возникновение скачка уровня тока в области насыщения, так называемого кинк-эффекта, который виден на выходной характеристике [9]. Кинк-эффект обусловлен образованием паразитного биполярного транзистора в структуре КНИ КМОП-транзистора (см. рис. 1) вследствие накопления дырок в изолированном рабочем теле (кармане) прибора. Накопленные дырки изменяют плавающий потенциал кармана и приводят к открытию эмиттерного перехода биполярного транзистора и возникновению дополнительно к току инверсионного канала КНИ КМОП-транзистора тока через объем кармана, что и вызывает скачок тока прибора [10].

Потенциал кармана V_k , который создает накопленные дырки, определяется зарядом дырок Q_d и суммарной емкостью верхнего $C_{в.з}$ и нижнего $C_{н.з}$ затворов истока C_S и стока C_D :

$$V_k = Q_d / C_k, \quad (3)$$

где $C_k = C_S + C_D + C_{в.з} + C_{н.з}$.

На рис. 4 представлены смоделированные ВАХ КНИ КМОП-транзисторов с разным смещением на затворе и геометрическими параметрами канала. Результаты моделирования показывают, что вероятность возникновения паразитного биполярного транзистора и, следовательно, кинк-эффекта существенно зависит от геометрических параметров каналов КНИ КМОП-транзисторов. Наиболее ярко этот эффект проявляется при использовании прибора с малыми размерами каналов, что вносит ограничения на использование таких транзисторов при проектировании КНИ КМОП СБИС.

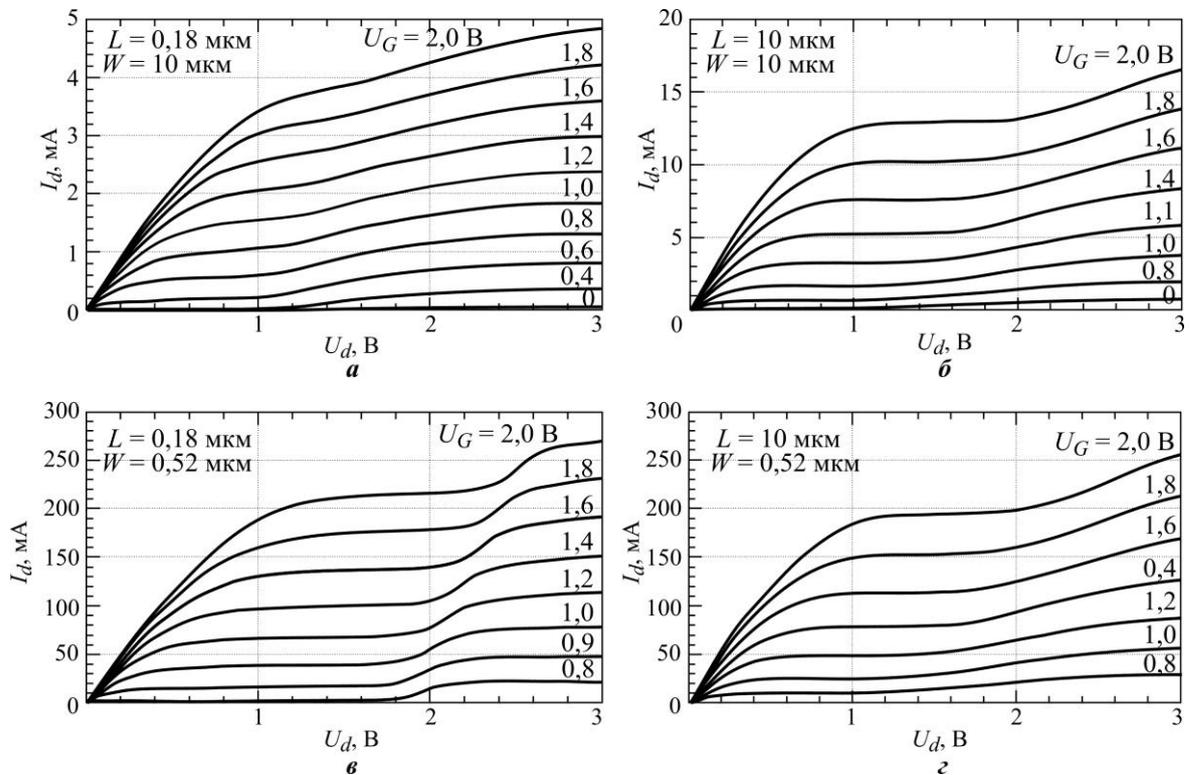


Рис. 4. Смоделированные ВАХ КНИ КМОП-транзисторов с разными смещением на затворе и геометрическими параметрами канала

Fig. 4. Simulated output characteristics $I_d(U_d)$ of SOI CMOSFETs with different gate offset and channel geometry

Заключение. Расчетные и экспериментальные данные показали, что паразитный эффект плавающего кармана и кинк-эффект оказывают критическое влияние на основные характеристики КНИ КМОП-транзисторов. Представленная разработанная компактная Spice-модель КНИ КМОП-транзистора на основе модели BSIMSOIv4.5 учитывает влияние длины и ширины канала, а также потенциала кармана на пороговое напряжение, ток стока в канале и описывает возникновение кинк-эффекта.

Полученные в данной работе результаты позволяют при проектировании ИС повысить предсказуемость поведения, точность и стабильность работы прибора и увеличить его производительность.

Литература

1. **Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В.** Общая теория технологии и микроэлектроника. Ч. 3: Уровень технологической операции // *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника*. 2018. № 3 (171). С. 63–93.
2. **Vandana B.** Study of floating body effect in SOI technology // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2013. Vol. 3. Iss. 3. P. 1817–1824.
3. **Шипицын Д. С., Потупчик А. Г., Шемякин А. В., Яшин Г. А.** Разработка способа учета особенностей ВАХ транзистора, работающего в переходном режиме от PDSOI/FDSOI в компактной модели // *Наноиндустрия*. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 362–365. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.362.365>
4. Is there a kink effect in FDSOI MOSFETs? / **H. J. Park, M. Bawedin, K. Sasaki et al.** // 2017 Joint International EUROSIOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSIOI-ULIS). Athens: IEEE, 2017. P. 212–215. <https://doi.org/10.1109/ULIS.2017.7962564>
5. **Park H., Lee K., Colinge J.-P., Cristoloveanu S.** Is FD-SOI immune to floating body effects? // 2018 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S). Burlingame, CA: IEEE, 2018. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/S3S.2018.8640198>
6. BSIMSOIv4.5.0 MOSFET model: user's manual / BSIM group. Berkeley, CA: UC Department of EECS, 2013. 129 p.
7. **Денисенко В. В.** Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М.: Физматлит, 2010. 409 с.
8. **Wu W., Yao W., Gildenblat G.** PSP-SOI: A surface-potential-based compact model of SOI MOSFETs // *Compact modeling: Principles, techniques and applications* / ed. G. Gildenblat. Dordrecht: Springer, 2010. P. 41–74. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8614-3_2
9. **Tsividis Y., McAndrew C.** Operation and modeling of the MOS transistor. 3rd ed. Oxford: Oxford Univ. Press, 2011. 723 p.
10. **Cristoloveanu S., Li Sh. S.** Electrical characterization of silicon-on-insulator materials and devices. New York: Springer, 1995. XV, 381 p. (Springer International Series in Engineering and Computer Science). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2245-4>

Статья поступила в редакцию 09.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.11.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Кириллова Анастасия Владимировна – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-конструктор АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1), akirilova@niime.ru

Королёв Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mikor33@rambler.ru

References

1. Krasnikov G. Ya., Gornev E. S., Matushkin I. V. General theory of technology and microelectronics. Part 3. Technological operation level. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3. Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*, 2018, no. 3 (171), pp. 63–93. (In Russian).
2. Vandana B. Study of floating body effect in SOI technology. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 1817–1824.
3. Shipitsin D. S., Potupchik A. G., Shemyakin A. V., Yashin G. A. Development of a method for taking into account the features of the I-V characteristics of a transistor operating in transition from PDSOI to FDSOI. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2020, vol. 13, no. S4 (99), pp. 362–365. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.362.365>

4. Park H. J., Bawedin M., Sasaki K., Martino J.-A., Cristoloveanu S. Is there a kink effect in FDSOI MOSFETs? *2017 Joint International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSOI-ULIS)*. Athens, IEEE, 2017, pp. 212–215. <https://doi.org/10.1109/ULIS.2017.7962564>

5. Park H., Lee K., Colinge J.-P., Cristoloveanu S. Is FD-SOI immune to floating body effects? *2018 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S)*. Burlingame, CA, IEEE, 2018, pp. 1–3. <https://doi.org/S3S.2018.8640198>

6. BSIM group. *BSIMSOIv4.5.0 MOSFET model*, user’s manual. Berkeley, CA, UC Department of EECS, 2013. 129 p.

7. Denisenko V. V. *Compact models of MOSFETs for SPICE in micro- and nanoelectronics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 409 p. (In Russian).

8. Wu W., Yao W., Gildenblat G. PSP-SOI: A surface-potential-based compact model of SOI MOSFETs. *Compact modeling: Principles, techniques and applications*, ed. G. Gildenblat. Dordrecht, Springer, 2010, pp. 41–74. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8614-3_2

9. Tsvividis Y., McAndrew C. *Operation and modeling of the MOS transistor*. 3rd ed. Oxford: Oxford Univ. Press, 2011. 723 p.

10. Crisoloveanu S., Li Sh. S. *Electrical characterization of silicon-on-insulator materials and devices*. New York, Springer, 1995. xv, 381 p. (Springer International Series in Engineering and Computer Science). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2245-4>

The article was submitted 09.11.2022; approved after reviewing 21.11.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Anastasia V. Kirillova – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Design Engineer, “Research Institute of Molecular Electronics” JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Akademik Valiev st., 6, bld. 1), akirillova@niime.ru

Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), mikor33@rambler.ru

Уважаемые авторы!

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

Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве

I. Система и алгоритмы реализации для различных категорий изделий

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

ymtos@spels.ru

Аннотация. Анализ действующей системы контроля радиационной стойкости показывает, что для эффективности ее работы необходимо проведение операций контроля в процессе серийного производства с учетом особенностей каждого этапа жизненного цикла изделий микроэлектроники. В работе предложен подход к обеспечению прогнозного контроля стабильности радиационной стойкости изделий микроэлектроники в процессе производства с учетом категории радиационной стойкости каждого типа микросхем. Показано, что разработанные базовые алгоритмы прогнозного контроля стабильности радиационной стойкости микросхем в серийном производстве для каждой из категорий радиационной стойкости гарантируют необходимую полноту, достоверность и информативность контроля при минимизации технико-экономических затрат и объема радиационных испытаний.

Ключевые слова: радиационная стойкость, базовый технологический процесс, категории радиационной стойкости, план контроля

Для цитирования: 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>

Prediction analysis of the microcircuits' radiation hardness within fabrication process

I. System and implementation algorithms for various product categories

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

ymmos@spels.ru

Abstract. The analysis of operating system of radiation hardness assurance shows that in order to work effectively, it requires radiation hardness control during fabrication, considering the features of each stage of microelectronic product life cycle. In this work an approach to providing predictive control of the stability of the radiation resistance of microelectronics products in the production process, taking into account the category of radiation resistance of each type of microcircuits. It is shown that the developed basic algorithms for predictive control of the stability of the radiation resistance of microcircuits in mass production for each of the categories of radiation resistance guarantee the necessary completeness, reliability and informative control while minimizing technical and economic costs and the volume of radiation tests.

Keywords: radiation hardness, core manufacturing process, radiation hardness categories, inspection plan

For citation: 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>

Введение. К изделиям микроэлектроники, предназначенным для применения в условиях радиационных воздействий, согласно нормативным документам, предъявляются требования по радиационной стойкости (РС). Обеспечение требований и оценка соответствия им изделий микроэлектроники проводят на всех этапах их жизненного цикла: при разработке, производстве и эксплуатации. На практике основным для обеспечения РС изделий микроэлектроники считается этап разработки. На данном этапе осуществляется выбор базового технологического процесса изготовления, библиотек элементов и сложнофункциональных блоков (СФБ), правил проектирования, а также конструктивно-технологических и схемно-топологических методов обеспечения РС с учетом режимов, сроков и условий эксплуатации. При этом нередко значение этапа серийного производства для обеспечения РС изделий микроэлектроники недооценено.

При серийном производстве для изделий, к которым предъявляются требования по РС, регламентирован контроль каждой производственной партии пластин перед отгрузкой потребителю. Однако на практике этого недостаточно. Обеспечение РС должно

быть реализовано комплексом мероприятий, позволяющих спрогнозировать и оценить РС микросхем на этапе прохождения изделия по маршруту изготовления на основе использования всей информации, полученной на стадиях разработки, аттестации и постановки базового технологического процесса (БТП). Это позволит обоснованно спрогнозировать обеспечение заданной категории стойкости для широкой номенклатуры конструктивно подобных изделий, а также учесть особенности влияния флуктуаций (изменения) режимов и условий операций, входящих в маршрут БТП.

Категории радиационной стойкости. Практическая реализация базовой технологии обеспечения, прогнозирования и контроля РС изделий микроэлектроники во многом определяется категорией РС каждого типа микросхем. В зависимости от целевой функции в аппаратуре и заданных требований по РС изделия можно условно отнести к одной из четырех категорий – от РС0 (минимальная) до РС3 (предельная) [1]:

1) категория РС0 – изделия общего гражданского (общетехнического или промышленного) назначения, для которых требования по РС не регламентированы (по международной классификации Commercial off the Shelf, COTS [1–3]). При создании изделий данной группы проводят либо определительные радиационные испытания для общей оценки потенциально возможных областей их применения, либо сертификационные испытания для определения возможности применения в конкретной аппаратуре. Данные меры способствуют повышению технико-экономической эффективности разработки и производства за счет расширения потенциальных областей применения гражданской продукции;

2) категория РС1 – изделия с базовыми (минимальными) требованиями по РС (Basic) [1–3]. При создании изделий данной группы применяют БТП без использования специальных конструктивно-топологических и схемно-топологических решений по обеспечению РС в ходе проектирования. При разработке необходимо контролировать возникновение катастрофических (необратимых) радиационных отказов, например, вследствие грубых ошибок проектирования, а при их выявлении – определять механизм отказа и проводить коррекцию;

3) категория РС2 – изделия с повышенным уровнем РС (Rad Tolerant) [1–3] и со значимыми требованиями по РС в сочетании с высокими функциональными и технико-экономическими показателями. При создании изделий данной группы применяют стандартные БТП в совокупности со специальными библиотеками элементов, схемно-топологическими и конструктивными решениями по обеспечению РС при проектировании. Важным является обеспечение максимальных уровней РС в рамках выбранного БТП, библиотек элементов и норм проектирования. Как правило, не допускаются катастрофические отказы изделий в процессе и после радиационных воздействий, но возможны кратковременные сбои. Изделия данной группы обычно применяют в составе бортовой аппаратуры ракетно-космической техники;

4) категория РС3 – изделия с предельным уровнем РС (Rad Hard) [1–3] и с максимальным уровнем требований. При их создании применяют определенные БТП (кремний на изоляторе, кремний на сапфире, карбид кремния и др.) в сочетании со специальными библиотеками, схемно-топологическими и конструктивными решениями по обеспечению РС. Максимально возможный уровень РС может быть обеспечен даже за счет снижения функциональных и технико-экономических показателей. Катастрофические отказы и кратковременные сбои в работе изделий в процессе и после радиационного воздействия, как правило, не допустимы.

Радиационно-ориентированная характеристика базовых технологических процессов и библиотек элементов. Мероприятия по обеспечению и контролю РС изделий микроэлектроники должны проводиться взаимосвязанно на всех этапах жизненного цикла изделий: при разработке, производстве и поставке (эксплуатации). На каждом этапе проводят комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению и контролю РС, результаты которых «передаются» с предыдущего этапа в качестве исходной информации на последующий (текущий) и являются базой для развития и повышения эффективности мероприятий на этом и следующем этапах.

Положительный результат для обеспечения РС «закладывается» еще до начала разработки – на этапе задания технических требований к опытно-конструкторской работе (ОКР) и формирования технического задания на ОКР. В соответствии с техническим заданием уже на этапе разработки технического проекта ОКР должен проводиться обоснованный выбор БТП, библиотек элементов, правил проектирования (Project Design Kit, PDK), которые в совокупности с результатами радиационно-ориентированной характеристики (РОХ) библиотек элементов и СФБ, критичных фрагментов, паразитных структур образуют конструктивно-технологическую платформу создания изделий микроэлектроники [4–6]. При этом РОХ проводится с целью оценки типовых и предельных характеристик БТП специализированных библиотек и инструментов проектирования, обеспечивающих требуемое сочетание функциональных, рабочих и эксплуатационных характеристик будущих изделий, идентификации параметров радиационно-ориентированных моделей [7, 8] САПР, необходимых для проектирования изделий.

В ходе РОХ в общем случае:

- выявляют доминирующие радиационные эффекты, возможные виды и механизмы радиационных отказов изделий, реализованных в рамках заданного БТП;
- определяют характерные зависимости информативных параметров-критериев годности типовых объектов исследований, характеризующих БТП, от уровней радиационных воздействий, режимов и условий эксплуатации (в том числе температуры);
- определяют типовые и предельные уровни РС, обеспечиваемые БТП, по результатам испытаний и анализа уровней РС тестовых структур и типовых изделий-аналогов, изготовленных по данному БТП с использованием выбранных библиотек элементов;
- проводят идентификацию параметров радиационно-ориентированных моделей критичных базовых (библиотечных) элементов и паразитных структур по результатам исследований радиационных откликов тестовых структур и верификацию по результатам исследований радиационных откликов типовых оценочных схем: критичных фрагментов, функциональных блоков и типовых изделий;
- определяют типовые объекты для последующего статистического контроля и мониторинга стабильности БТП – параметры-мониторы и схемы контроля технологии (СКТ) в соответствии с [1].

В качестве объектов исследований для РОХ выбирают тестовые структуры, библиотечные элементы, СФБ и типовые изделия или типовые оценочные схемы, являющиеся «слабым звеном», определяющим типовые уровни РС всей номенклатуры разрабатываемых по БТП изделий. Набор и последовательность операций РОХ зависят от заданной категории РС.

Изделия категории РС0 не требуют РОХ БТП. Вместе с тем в отечественной практике обычной является ситуация, когда изделия различного назначения изготавливают на одних и тех же линейках, разрабатывают их одни и те же специалисты с использованием одного и того же инструментария проектирования, а различаются такие изделия только объемом контроля и гарантией качества конечной продукции. Поэтому для рас-

ширения областей применения изделий категории РС0 следует в ходе ОКР проводить их определительные радиационные испытания с внесением результатов в раздел справочных данных технических условий (ТУ). Тогда при использовании радиационно охарактеризованного БТП обеспечиваемые им типовые уровни РС могут быть распространены на всю выпускаемую продукцию.

Изделия категории РС1 с базовым уровнем РС при разработке и производстве требуют РОХ БТП. Однако для данной категории изделий допустим сокращенный маршрут РОХ по результатам радиационных испытаний ранее разработанных и реализованных на данном БТП аналогов типовых изделий. Тогда при обоснованном запасе и контролируемых разбросах показателей РС их допустимо распространять на все разрабатываемые и изготавливаемые изделия того же класса. Таким образом, использование радиационно охарактеризованных БТП снижает необходимость проведения испытаний готовых изделий, что повышает технико-экономические показатели продукции. Для данной категории статистический контроль БТП принято проводить по тестовым структурам: параметрам-мониторам и СКТ без радиационных испытаний и учета специфики обеспечения РС.

Изделия категории РС2 с повышенным уровнем РС требуют полноценной РОХ БТП и всего инструментария проектирования – правил проектирования, моделей, библиотек элементов и СФБ. Учитывая значимость требований по РС и трудности ремонта в составе аппаратуры отказавших изделий, выбор БТП, не прошедшего РОХ для выполнения ОКР и последующего серийного производства, проводить нежелательно. Это обосновывает необходимость 100%-ных испытаний всех изделий с негарантированным результатом (соответствием). В виде исключения допускается РОХ БТП непосредственно в ходе ОКР, но на практике на это, как правило, не хватает ни времени, ни средств. Важно, что в маршруте РОХ БТП должны быть предусмотрены мероприятия по контролю и обеспечению стабильности РС. В дополнение к статистическому контролю электрических параметров по параметрам-мониторам и СКТ обязателен контроль стабильности радиационно-чувствительных параметров радиационно-ориентированных моделей с целью подтверждения актуальности данных РОХ на основе радиационных испытаний СКТ и/или готовых изделий, принятых в качестве типовых оценочных схем.

К изделиям категории РС3 с предельным уровнем РС предъявляются максимально жесткие требования к РОХ БТП и всему инструментарию разработки и производства изделий. При этом внимание должно уделяться статистически обоснованным экспериментальным данным о запасах по уровням РС относительно заданных требований и разбросам этих уровней, фактически обеспечиваемым для аналогов типовых представителей изделий. Важно, что в состав технологической документации в обязательном порядке включают мероприятия по статистическому контролю стабильности радиационно-чувствительных параметров, обеспечиваемых БТП и подтверждающих актуальность РОХ (в том числе на основе радиационных испытаний СКТ или готовой продукции на уровне партий пластин или 100%-ной разбраковки всех выпускаемых изделий).

Система обеспечения и контроля радиационной стойкости в процессе жизненного цикла изделий микроэлектроники. Полученные в результате РОХ данные являются исходными и базовыми для радиационно-ориентированного проектирования изделий в ходе ОКР. При этом основной объем работ по выполнению требований по РС и радиационным испытаниям полуфабрикатов, экспериментальных образцов и готовых изделий приходится именно на этап разработки, где в ходе проектирования изделия проводят выбор СФБ, конструктивную, топологическую и схемотехническую реализа-

ции изделий и системные меры парирования доминирующих радиационных отказов. В случае отсутствия информации о РОХ БТП недостающие фактические данные о БТП, необходимые для проектирования, разработчик изделия вынужден получать непосредственно в ходе ОКР, что полноценно реализовать трудно в условиях жестких временных и финансовых ограничений.

Разработанные на этапе ОКР изделия подвергаются предварительным радиационным испытаниям для оценки соответствия требованиям технического задания в процессе приемки результатов ОКР. Для экономии ресурсов существует практика объединения и взаимного зачета различных видов радиационных испытаний изделий. Полученные на этапе ОКР гарантируемые уровни РС включают в ТУ и используют в качестве опорных для последующего контроля при производстве. Следует особо отметить необходимость именно на этапе ОКР определять типовые оценочные схемы и конкретные методики (состав и методы измерения параметров-критериев годности, режимы и условия испытаний) для последующего контроля РС в производстве, что фиксируется в технологической документации.

При любых видах производства, включая мелкосерийное и единичное, для изделий с повышенным уровнем РС регламентированы меры по контролю (гарантированию) стабильности показателей РС в виде испытаний партий пластин – группа «Е». Однако конкретные методические рекомендации по характеру этого контроля (сплошной, выборочный или периодический) и его организации не регламентированы. Это обстоятельство не гарантирует РС изделий для конечных потребителей и обуславливает актуальность разработки методических подходов к обеспечению эффективного контроля РС в процессе серийного производства изделий микроэлектроники. Основными источниками нестабильности необходимого уровня РС в процессе производства являются: контролируемые или неконтролируемые вариации технологического процесса вследствие изменений исходных материалов (например, пластин); вариации и разбросы режимов и условий выполнения технологических операций; не декларируемая разработчиком коррекция конструктивно-топологической реализации изделий.

Однако любые вносимые изменения в технологический процесс производства изделия, потенциально способные оказать влияние на уровень РС, требуют проведения типовых радиационных испытаний, а это влечет за собой остановку производства и дополнительные затраты. Отсюда предпринимаются попытки недекламируемых коррекций топологии изделий (в ходе их доработки в процессе производства) или смены поставщиков исходных пластин без проведения типовых испытаний. Отсутствие на производстве системы контроля РС изделий приводит к искажению результатов РОХ и квалификационных испытаний такой модифицированной серийной продукции. Достаточным могло бы быть проведение контроля партий пластин (на типовой оценочной схеме), например, в диапазоне температур среды с зачетом результата в качестве типового.

Отдельные мероприятия по контролю уровня РС проводят и на этапе поставки и эксплуатации изделий в аппаратуре в виде входного контроля (на соответствие ТУ и при отбраковке по ужесточенным нормам) и сертификационных испытаний поставочных партий изделий в режимах и условиях эксплуатации в аппаратуре, которые могут быть как облегченными относительно заданных в ТУ, так и более жесткими, т. е. за рамками ТУ. В первом случае, например, при ограниченных диапазонах температур среды, напряжений питания или рабочих частот допускается уточнение нормативного уровня РС в сторону повышения. Во втором случае, при ужесточении режимов или условий применения, может потребоваться коррекция нормированного уровня РС или норм на отдельные параметры в сторону их снижения.

На этапе проектирования аппаратуры практикуется проведение радиационных испытаний, положительные результаты которых могут распространяться на все примененные изделия микроэлектроники. Если в ТУ они имеют значительный (например, трехкратный) запас по уровню РС относительно требований к аппаратуре, то может быть принято решение не проводить радиационные испытания аппаратуры. Однако такое решение будет тогда методически и юридически оправданным, когда уровни РС изделий будут контролироваться и подтверждаться при производстве.

Таким образом, мероприятия по контролю и обеспечению РС на всех этапах жизненного цикла микросхем, включая серийное производство, должны быть взаимоувязаны в единый комплекс и обеспечивать гарантию уровня РС для потребителя изделий.

Организация контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники в процессе производства в зависимости от категорий стойкости изделий. На многих предприятиях-изготовителях микросхем отсутствует практика РОХ и соответствующей аттестации БТП по РС, а статистическое регулирование технологического процесса с учетом параметров РС не проводится. По сути, единственный принятый на сегодняшний день формат контроля РС в процессе производства – это испытания производственных партий пластин, проводимые перед отгрузкой продукции и являющиеся долговременной (в условиях производства) и дорогостоящей контрольно-технологической операцией. При получении отрицательных результатов контроля партий пластин корректировка схемно-топологического исполнения изделия уже невозможна и производитель обязан либо забраковать всю партию, либо оформить решение потребителя о готовности получать продукцию, не соответствующую требованиям ТУ. Между тем аттестованный и охарактеризованный по РС БТП позволяет снизить временные и экономические затраты на подтверждение РС готовых изделий за счет организации контроля и статистического регулирования в процессе производства.

Система обеспечения и контроля РС в ходе освоения и серийного выпуска изделия складывается из двух составляющих: статистического контроля, мониторинга БТП по параметрам-мониторам и СКТ и контроля РС готовой продукции по типовым оценочным схемам (в виде тестовых схем или готовых изделий). Состав, общий объем и последовательность мероприятий в рамках системы мониторинга и статистического регулирования БТП и плана контроля изделия выбираются на основании требований по РС в рамках категорий РС (РС1, РС2, РС3), экспериментальных данных, полученных в процессе РОХ, и экспериментальных данных, полученных в ходе ОКР.

Учитывая категорию стойкости изделий и особенности БТП, можно рекомендовать следующий алгоритм работы системы гарантирования РС в процессе производства [9, 10]. Блок-схема алгоритма контроля РС при производстве изделий категории РС1, для которых требования РС заданы, но не критичны, представлена на рис. 1. Контроль партий пластин по РС проводят только в обоснованных случаях – при существенной нестабильности технологического процесса по результатам замеров параметров-монитором и СКТ, разработанных без учета доминирующих радиационных эффектов, а также при возможных недеклалируемых коррекциях схемно-топологической реализации изделий в ходе серийного производства (при декларируемых коррекциях, потенциально влияющих на РС, проводят типовые испытания) [10, 11].

Стабильность технологического процесса на уровне электрических характеристик параметров-монитором и СКТ является необходимым, но недостаточным условием для БТП изделий категорий РС2 и РС3, так как необходимо учитывать влияние неконтролируемых изменений технологического процесса на изменения характеристик



Рис. 1. Блок-схема контроля РС изделий категории РС1
 Fig. 1. RH1 (COTS) radiation hardness category products control block diagram

параметров-мониторов и СКТ в условиях радиационных воздействий. Даже небольшая флуктуация электрических параметров вследствие неконтролируемого изменения технологии может приводить к значительным изменениям в РС изделия. При контроле производственных партий изделий категорий РС2 и РС3 важный фактор – статистический контроль технологического процесса с учетом доминирующих радиационных эффектов и запасов РС относительно требований потребителя [12].

Производственный контроль изделий категории РС2 целесообразно осуществлять аналогично контролю партий пластин по РС, который проводится для каждой производственной партии или на периодической основе в зависимости от регулярности выпуска партий, запасов РС относительно требований и стабильности технологического процесса. Блок-схема алгоритма контроля изделий категории РС2 представлена на рис. 2.

Если по результатам контроля параметров-мониторов и СКТ технологический процесс стабилен, то:

- изделие имеет запасы по установленным уровням РС – испытания проводят на периодической основе;
- изделие не имеет запасов по установленным уровням РС – проводят испытания каждой производственной партии.

Если в ходе контроля параметров-мониторов и СКТ выявилась нестабильность, то:

- изделие имеет запасы по установленным уровням РС – проводят испытания каждой производственной партии;

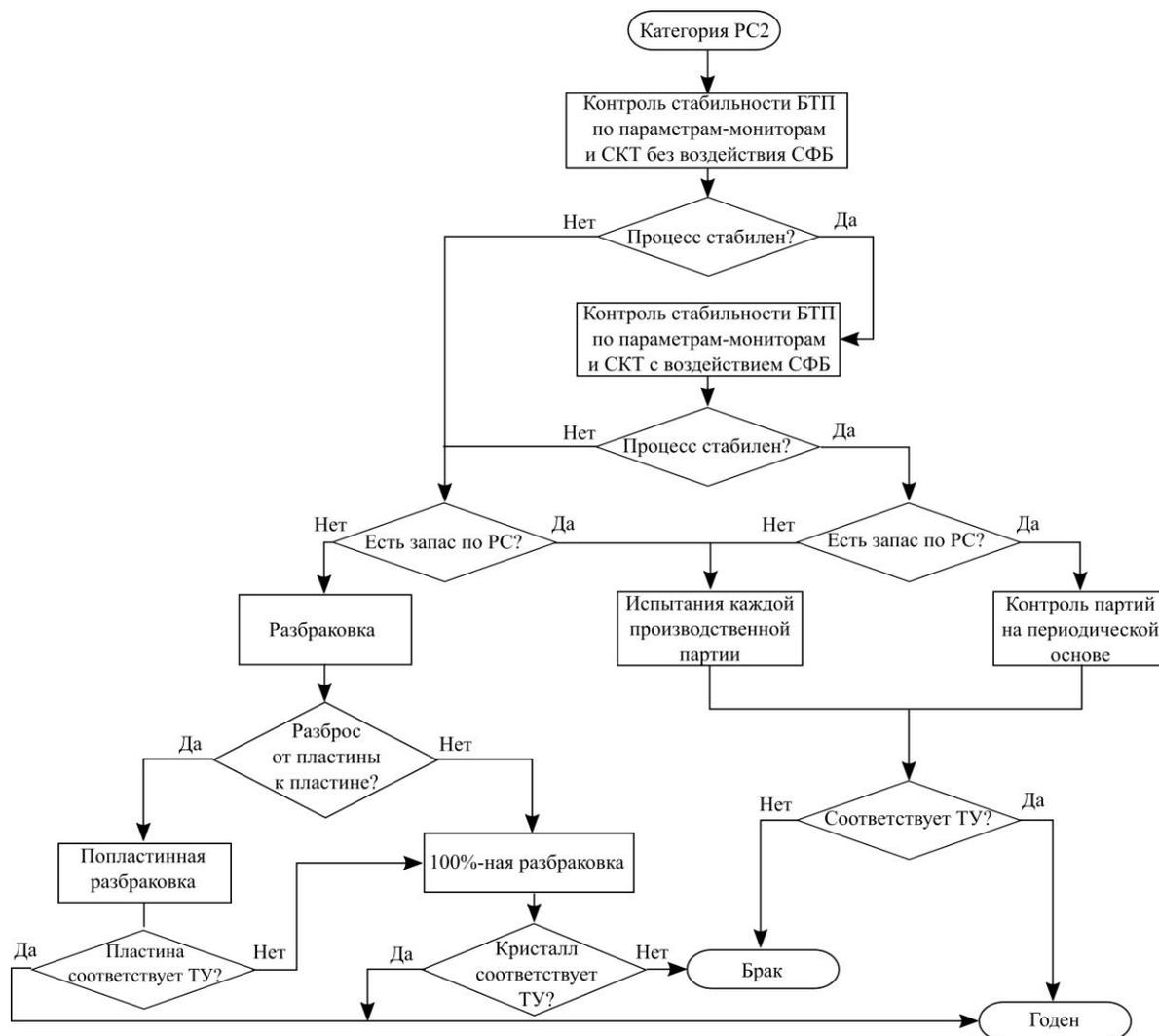


Рис. 2. Блок-схема контроля РС изделий категории PC2
 Fig. 2. RH2 (Rad Tolerant) radiation hardness category products control block diagram

– изделие не имеет необходимого запаса относительно уровня требований – целесообразно провести разбраковку в зависимости от того, какого рода разброс обнаружен: от пластины к пластине (попластинная разбраковка) – каждая пластина принимается отдельной производственной партией, и проводят испытание каждой пластины; разброс по пластине – проводят 100%-ную разбраковку изделий.

Снизить объем радиационных испытаний можно за счет проведения анализа корреляции изменения электрических параметров-мониторов и СКТ вследствие разбросов параметров технологического процесса и изменения уровня РС изделия. Однако для современных технологий с проектными нормами менее 0,8 мкм информация о конкретных результатах таких работ отсутствует, хотя для процессов с проектными нормами 3,5 мкм и менее корреляционные зависимости получены [10, 13, 14]. Если БТП прошел этап РОХ и имеются актуальные результаты верификации радиационно-ориентированных моделей, возможно проведение операций расчетно-экспериментального прогнозирования с использованием элементов радиационно-ориентированных моделей. Отсутствие статистического контроля РС в БТП исключает переход на периодический контроль производственных партий.

Производственный контроль изделий категории РСЗ с предельными требованиями следует проводить, учитывая специальный БТП, с использованием «стойких» материалов и структур, а также специальных библиотек элементов и САПР, в том числе топологических, схмотехнических и алгоритмических решений. Блок-схема алгоритма контроля РС изделия категории РСЗ приведена на рис. 3.

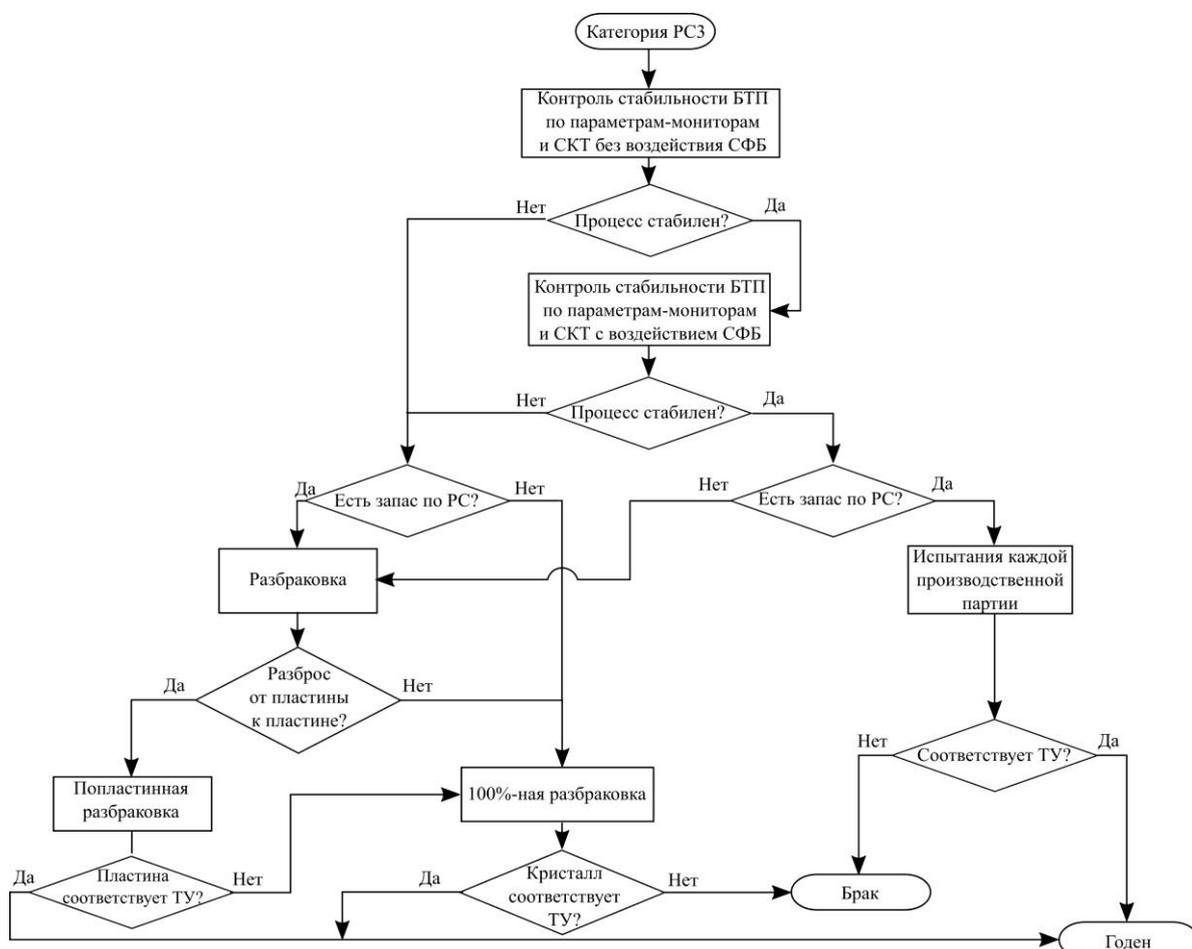


Рис. 3. Блок-схема контроля РС изделий категории РСЗ

Fig. 3. RH3 (Rad Hard) radiation hardness category products control block diagram

Если по результатам контроля параметров-мониторов и СКТ технологический процесс стабилен, то:

- изделие имеет запасы по установленным уровням РС – проводят испытания каждой производственной партии пластин;
- изделие не имеет запасов по установленным уровням РС – проводят 100%-ную разбраковку.

Если при контроле параметров-мониторов и СКТ выявлена нестабильность, то:

- изделие имеет запасы по установленным уровням РС – целесообразно проводить разбраковку в зависимости от того, какого рода разброс обнаружен: от пластины к пластине (попластинная разбраковка) – каждая пластина принимается отдельной производственной партией, и проводят испытание каждой пластины; разброс по пластине – проводят 100%-ную разбраковку изделий;
- изделие не имеет необходимого запаса относительно уровня требований – проводят 100%-ную разбраковку изделий.

Для изделий микроэлектроники категории РСЗ требования по РС наиболее критичны и требуют специальных гарантий, в том числе индивидуальных для каждой единицы продукции. Высокая стоимость таких изделий определяется их 100%-ной разбраковкой.

Важно, что объект контроля БТП – тестовые структуры, которые являются репрезентативными для технологического процесса (общего для группы изделий разного функционального назначения), а для контроля производственных партий пластин выбирается типовая оценочная схема, которая является репрезентативной для изделия или группы изделий, объединенных по близкому функциональному назначению, составу библиотечных элементов, системе параметров критериев годности.

Заключение. Рациональная организация статистического мониторинга базового технологического процесса и контроль РС готовой продукции позволяют перейти к эффективному прогнозному контролю стабильности радиационной стойкости изделий микроэлектроники в процессе производства. Анализ действующей системы обеспечения и контроля РС показал, что для ее эффективности необходимо проведение операций контроля в процессе серийного производства, что требует совершенствования системы с учетом особенностей каждого этапа жизненного цикла изделий микроэлектроники.

Разработанные базовые алгоритмы прогнозного контроля стабильности радиационной стойкости микросхем в серийном производстве для каждой из категорий РС позволяют оптимизировать технико-экономические показатели производства микросхем за счет рационального выбора объема и состава радиационных испытаний применительно для каждой из категорий.

Литература

1. **Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В.** Требование радиационной стойкости – экзотика для гурманов или гарантии наличия и технического уровня результата разработки для всех категорий потребителей ЭКБ? // Международный форум «Микроэлектроника-2017»: сб. тезисов 3-й Международ. науч. конф. (Республика Крым, г. Алушта, 02–07 окт. 2017 г.). М.: Техносфера, 2017. С. 32–36.
2. **Hash G. L., Shaneyfelt M. R., Sexton F. W., Winokur P. S.** Radiation hardness assurance categories for COTS technologies // 1997 IEEE Radiation Effects Data Workshop NSREC Snowmass 1997. Workshop Record Held in Conjunction with IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference. Snowmass, CO: IEEE, 1997. P. 35–40. <https://doi.org/10.1109/REDW.1997.629794>
3. **Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В.** Система оценки радиационной стойкости отечественных изделий электронной компонентной базы: гарантии и риски потребителей // Радиационная стойкость изделий ЭКБ / под ред. А. И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С. 19–41.
4. Радиационно-ориентированная и СВЧ-характеризация техпроцессов контрактного производства ЭКБ ТСВЧЭ, используемых отечественными ДЦ: состояние, проблемы и ближайшие задачи / **В. В. Елесин, Д. И. Сотсков, Н. А. Усачев и др.** // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 423–425. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.423.425>
5. Базовая технология проектирования широкой номенклатуры изделий СВЧ-диапазона вида «система на кристалле» и «система в корпусе», ориентированной на отечественные кремниевые и арсенид-галлиевые контрактные производства: достижения, проблемы и ближайшие задачи / **В. В. Елесин, Н. А. Усачев, А. Ю. Никифоров и др.** // Международный форум «Микроэлектроника-2019»: сб. тезисов 5-й Международ. науч. конф. «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» (Республика Крым, г. Алушта, 30 сент. – 05 окт. 2019 г.). М.: Техносфера, 2019. С. 28–31.
6. Displacement damage effects mitigation approach for heterojunction bipolar transistor frequency synthesizers / **D. I. Sotskov, V. V. Elesin, A. G. Kuznetsov et al.** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. Vol. 67. No. 11. P. 2396–2404. <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3015560>
7. Compact models for radiation hardening by design of SiGe BiCMOS, GaAs and SOI CMOS microwave circuits / **D. I. Sotskov, N. A. Usachev, V. V. Elesin et al.** // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Kazan: IEEE, 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438867>

8. **Елесин В. В., Сотсков Д. И., Усачев Н. А., Кузнецов А. Г.** Особенности создания и применения радиационно-ориентированных моделей при проектировании отказоустойчивых изделий СВЧ-диапазона класса «система на кристалле» и «система в корпусе» на основе кремния, кремний-германия и арсенида галлия // *Наноиндустрия*. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 339–341. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.339.341>

9. **Moskovskaya Yu.** Prediction analysis of the of ICs' radiation hardness considering stability of technological processes // *The proceedings of 20th All-Russian Scientific and Technical Conference "Radiation Resistance of Electronic Systems"* (Lytkarino, June 6–7, 2017). Lytkarino: NIP, 2017. P. 206–207.

10. **Московская Ю.** Общий методический подход к оценке радиационной стойкости БМК и полужаказных БИС на их основе // *Наноиндустрия*. 2017. № 1 (71). С. 50–59. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2017.71.1.50.5>

11. **Московская Ю. М.** Контроль радиационной стойкости изделий микроэлектроники в процессе серийного производства: варианты и критерии выбора оптимального методического подхода // *Наноиндустрия*. 2019. Спецвыпуск. С. 197–201. <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.197.201>

12. Состав и принцип формирования типовой оценочной схемы как имитатора БМК и полужаказных БИС на их основе для задач радиационных испытаний / **Ю. Московская, Р. Федоров, А. Денисов и др.** // *Наноиндустрия*. 2017. № 1 (71). С. 60–69. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2017.71.1.60.69>

13. **Awipi M., Drews S.** A non-destructive method of testing for radiation hardness of integrated circuits // *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2000. 'Preparing for The New Millennium'* (Cat. No. 00CH37105). Nashville, TN: IEEE, 2000. P. 349–354. <https://doi.org/10.1109/SECON.2000.845591>

14. Strategies for lot acceptance testing using CMOS transistors and ICs / **J. R. Schwank, F. W. Sexton, D. M. Fleetwood et al.** // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1989. Vol. 36. No. 6. P. 1971–1980. <https://doi.org/10.1109/23.45394>

Статья поступила в редакцию 10.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 24.11.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 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. Nikiforov A. Y., Telets V. A., Boychenko D. V. Radiation hardness requirements – the exotica for gourmets or a guarantee of the design result success and high technical level for all categories of consumers? *Mezhdunarodnyy forum "Mikroelektronika-2017"*, proceedings of 3rd International research-to-practice conference. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2017, pp. 32–36. (In Russian).

2. Hash G. L., Shaneyfelt M. R., Sexton F. W., Winokur P. S. Radiation hardness assurance categories for COTS technologies. *1997 IEEE Radiation Effects Data Workshop NSREC Snowmass 1997. Workshop Record Held in Conjunction with IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*. Snowmass, CO, IEEE, 1997, pp. 35–40. <https://doi.org/10.1109/REDW.1997.629794>

3. Nikiforov A. Y., Telets V. A., Boychenko D. V. Assessment system of the radiation stability of national electronic component base products: consumer safeguards and risks. *Radiatsionnaya stoykost' izdeliy EKB*, ed. A. I. Chumakov. Moscow, National Research Nuclear University MPhI, 2015, pp. 19–41. (In Russian).

4. Elesin V. V., Sotskov D. I., Usachev N. A., Kuznetsov A. G., Seletskiy A. V., Fazykhanov O. R., Filaretov A. G. Radiation-oriented and microwave characterization of technological processes of the contract production by solid-state microwave electronic components used by domestic DC: status, problems and immediate tasks. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2020, vol. 13, no. S4 (99), pp. 423–425. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.423.425>
5. Elesin V. V., Usachev N. A., Nikiforov A. Y., Telets V. A., Sotskov D. I., Kuznetsov A. G., Chukov G. V., Shhepanov A. N. Basic design technology of wide range of microwave systems “system on crystal” and “system in housing”, focused on national silicon and arsenide-gallium manufacturing on the contract: achievements, problems and nearest tasks. *Mezhdunarodnyy forum “Mikroelektronika-2019”*, proceedings of 5th International research-to-practice conference. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2019, pp. 28–31. (In Russian).
6. Sotskov D. I., Elesin V. V., Kuznetsov A. G., Zhidkov N. M., Metelkin I. O., Amburkin K. M., Amburkin D. M., Usachev N. A., Boychenko D. V., Elesina V. V. Displacement damage effects mitigation approach for heterojunction bipolar transistor frequency synthesizers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, vol. 67, no. 11, pp. 2396–2404. <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3015560>
7. Sotskov D. I., Usachev N. A., Elesin V. V., Metelkin I. O., Zhidkov N. M., Nikiforov A. Y. Compact models for radiation hardening by design of SiGe BiCMOS, GaAs and SOI CMOS microwave circuits. *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Kazan, IEEE, 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438867>
8. Elesin V. V., Sotskov D. I., Usachev N. A., Kuznetsov A. G. Features of creating and using radiation-oriented models when designing fault-tolerant microwave products of the class “system on a chip” and “system in a package” based on silicon, silicon-germanium and gallium arsenide. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2020, vol. 13, no. S4 (99), pp. 339–341. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.339.341>
9. Moskovskaya Yu. Prediction analysis of the of ICs’ radiation hardness considering stability of technological processes. *Proceedings of 20th All-Russian Scientific and Technical Conference “Radiation Resistance of Electronic Systems”*. Lytkarino, NIIP, 2017, pp. 206–207 (In Russian).
10. Moskovskaya Yu. Common methodological approach to evaluation of radiation resistance of gate arrays and semicustom very large scale ICs based on them. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2017, no. 1 (71), pp. 50–59. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2017.71.1.50.5>
11. Moskovskaya Yu. M. Microelectronic parts’ radiation hardness assurance within fabrication process: Guidelines to rational methodical approach selection criteria. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2019, Special Issue, pp. 197–201. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.197.201>
12. 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>
13. Awipi M., Drews S. A non-destructive method of testing for radiation hardness of integrated circuits. *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2000. ‘Preparing for The New Millennium’ (Cat. No. 00CH37105)*. Nashville, TN, IEEE, 2000, pp. 349–354. <https://doi.org/10.1109/SECON.2000.845591>
14. Schwank J. R., Sexton F. W., Fleetwood D. M., Shaneyfelt M. R., Hughes K. L., Rodgers M. S. Strategies for lot acceptance testing using CMOS transistors and ICs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1989, vol. 36, no. 6, pp. 1971–1980. <https://doi.org/10.1109/23.45394>

The article was submitted 10.11.2022; approved after reviewing 24.11.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

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

Научная статья
УДК 004.021:004.932
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-2-202-211

Масштабируемая ПЛИС-система выборки и хранения данных для конвейерной обработки видеопотока

А. И. Шариков, Е. М. Шарикова

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

tohan757@yandex.ru

Аннотация. Для систем управления, использующих в качестве входной информации видеопоток, важным требованием в большинстве случаев является обработка в реальном масштабе времени. Как правило, этот фактор один из решающих при выборе вычислителя. Применение ПЛИС-систем позволяет не только решить проблемы, связанные с временем выполнения, но и реализовать один из эффективных вариантов с точки зрения энергоэффективности и производительности. В работе предложена схема, реализующая последовательный доступ ко всем областям каждого кадра видеопотока. Полученная подсистема может быть использована, в частности, в составе аппаратных алгоритмов фильтрации, обнаружения, сопровождения и классификации, т. е. в тех случаях, когда алгоритм решает задачу с целью поиска координат либо необходимо применить набор однотипных действий над каждой областью кадра. Разработан алгоритм оптимизации производительности для САПР Vivado. Для анализа использована ПЛИС семейства Artix-7 фирмы Xilinx. Доказана фактическая возможность масштабируемости полученной схемы. Показано, что максимально достижимая производительность схемы ограничена исключительно технологией конкретной ПЛИС, а количество затраченных ресурсов минимально и линейно зависит от числа пикселей, к которым требуется получить доступ.

Ключевые слова: обработка изображений, обработка в реальном времени, ПЛИС

Для цитирования: Шариков А. И., Шарикова Е. М. Масштабируемая ПЛИС-система выборки и хранения данных для конвейерной обработки видеопотока // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 202–211. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-202-211>

Original article

Scalable sample-and-hold FPGA system for pipelined video stream processing

A. I. Sharikov, E. M. Sharikova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

tohan757@yandex.ru

Abstract. Generally, processing in real time is the important requirement for control systems that use a video stream as input information. Most commonly, this factor is one of the decisive when choosing a calculator. The use of FPGA systems allows not only to solve problems associated with runtime, but also to implement one of the most efficient options in terms of energy performance and functioning capability. In this work, a scheme that implements sequential access to all areas of each frame of the video stream is proposed. The resulting subsystem can be used, in particular, as part of hardware algorithms for filtering, detection, tracking and classification, that is, in cases where the algorithm solves the problem in order to find coordinates or it is necessary to apply a set of same-type actions over each area of the frame. A performance optimization algorithm for CAD Vivado has been developed. As a result, the actual scalability of the realized circuit is proved. It was demonstrated that the maximum achievable performance of this circuit is limited solely by the technology of a particular FPGA, and the amount of spent resources is minimal and linearly depends on the number of pixels that need to be accessed.

Keywords: image processing, real-time processing, FPGA

For citation: Sharikov A. I., Sharikova E. M. Scalable sample-and-hold FPGA system for pipelined video stream processing. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 202–211. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-202-211>

Введение. Видеообработка как область вычислительной техники имеет большое значение при создании систем управления с использованием визуальной информации [1, 2]. Видеопоток, являясь основным источником входных данных, содержит строго структурированное представление, участки которого для подавляющего числа алгоритмов в общем случае имеют равнозначную ценность. Таким образом, можно выработать единые подходы для решения многих задач.

К алгоритмам обработки могут относиться алгоритмы фильтрации, поиска и обнаружения [3, 4]. Для последнего основная задача – классификация и разделение всех участков каждого изображения по заданным критериям на условно принятые объекты и фон [5, 6]. Рассматривая скорость обработки изображений посредством классических методов, а именно с помощью процессорных систем, следует отметить, что помимо типичных операций, связанных с выделением памяти, а также с переносом входных данных из одной области памяти в другую, временные затраты обусловлены вычислениями с использованием блоков памяти со случайным доступом (Random Access Memory, RAM). Вследствие этого быстродействие ограничивается скоростью работы с памятью, а также по принципу построения такие системы не являются полностью масштабируе-

мыми ввиду увеличения издержек доступа с ростом объемов памяти. Отметим, что данные проблемы частично решаются с использованием мультипроцессорных платформ. Это связано с возможностью децентрализации обрабатываемых данных [7, 8].

В настоящей работе рассматриваются полностью масштабируемые системы, в которых увеличение одного или нескольких параметров возможно за счет пропорционального увеличения числа элементов, входящих в него, без существенных потерь в других характеристиках со скоростью ниже полиномиальной [9, 10].

Модуль доступа. В простом варианте несжатый видеопоток имеет регулярную структуру, а данные в нем разбиты на кадры, каждый из которых, в свою очередь, разбит на заданное число строк фиксированной длины. Фактически при таком подходе скорость передачи пикселей определяется и линейно зависит от требуемой кадровой частоты. Соответственно, для системы необходимо обеспечить частоту не ниже заданной. Основными неразрешимым факторами, влияющими на максимальную частоту, являются технологический процесс выбранной ПЛИС, а также архитектура элементов, входящих в нее. Разработанную систему можно представить в виде схемы параллельного доступа к рядам пикселей изображения (рис. 1).

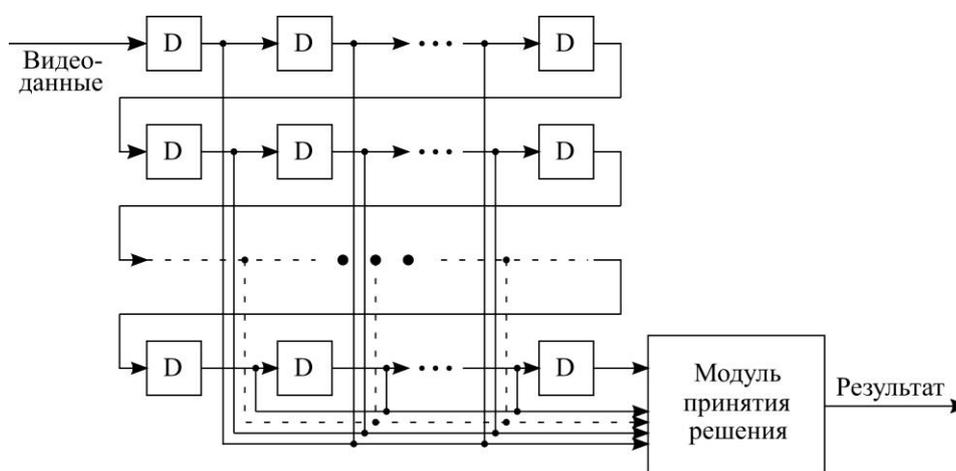


Рис. 1. Схема параллельного доступа к кадру изображения
 Fig. 1. Scheme of parallel access to an image frame

Каждая из ячеек памяти D, изображенная на схеме, состоит из группы параллельных D-триггеров в количестве, совпадающем с разрядностью линии данных. Все регистры связаны между собой последовательно, а часть их выходов соединена с модулем принятия решения. Какие именно выходы требуется использовать, должно быть определено непосредственно алгоритмом. На рис. 1 показан общий случай – сдвиговое окно в форме прямоугольника. Все схемы тактируются одной общей пиксельной частотой, с которой синхронизирован входной поток. Для случаев, когда в интерфейсе входной поток информации прерываемый, в состав блока добавляется дополнительный сигнал разрешения записи, подключаемый к каждому триггеру. Учитывая особенности архитектуры ПЛИС, необходимо оценивать ограниченность ресурсов состава ПЛИС. Сдвиговое окно занимает часть ширины кадра, поэтому нет необходимости реализовывать все задержки с использованием триггеров ввиду избыточного роста занимаемой площади и роста времени имплементации. Исходя из этого, оптимизация предполагает задействовать блоки памяти произвольного доступа (Block Random Access Memory, BRAM) (рис. 2).

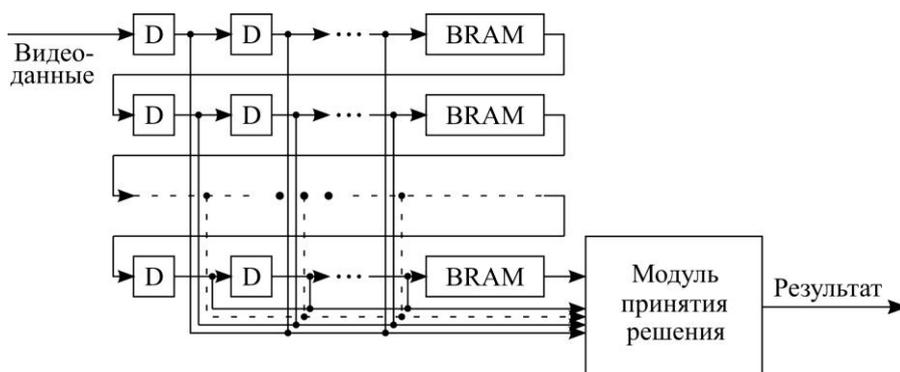


Рис. 2. Оптимизированная схема параллельного доступа к кадру изображения
 Fig. 2. Optimized scheme of parallel access to the image frame

Структура модуля BRAM представлена в виде линии задержки, построенной на базе одноименного блока двухпортовой блочной RAM (рис. 3). Подобный элемент является типовым для современной ПЛИС-архитектуры. Одним из очевидных недостатков применения блочной RAM в общем случае является невозможность полностью ее задействовать, так как каждый элемент определен архитектурой конкретной микросхемы с возможностью реализации только одной линии задержки из-за отсутствия у блочной RAM дополнительных интерфейсов. При превышении имеющегося диапазона адресов для данной ячейки над необходимым допустима организация арбитража с целью дополнительной оптимизации. Это позволит получить несколько линий задержки на базе одной блочной RAM. В таком случае максимально допустимая частота будет сокращена кратно количеству реализуемых интерфейсов.

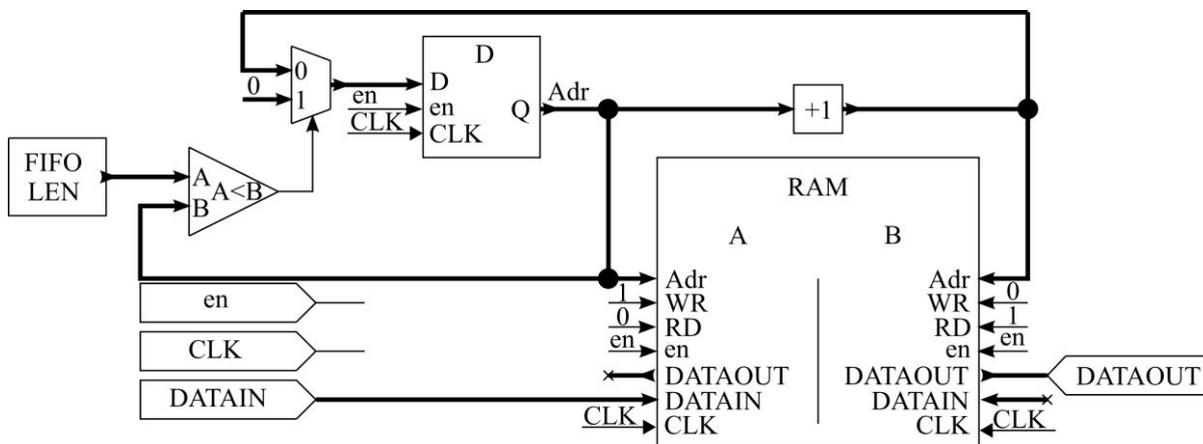


Рис. 3. Реализация линии задержки на базе двухпортовой блочной RAM
 Fig. 3. Delay line implementation based on dual-port block RAM

Из схемы на рис. 3 видно, что один из портов (A) всегда используется по записи, а второй (B) – по чтению. Реализация предполагает хранить фиксированное число слов данных, определяемое переменной FIFO LEN. Таким образом, полученная схема является аппаратным кольцевым буфером.

Имплементация. В качестве платформы использована ПЛИС фирмы Xilinx семейства Artix-7 xc7a200-1, в качестве САПР – Vivado 2019.1. Для более точной оценки результата необходимо рассмотреть зависимость максимальной производительности от входных параметров, таких как размеры сдвигового окна и разрядность данных. В общем случае важно не абсолютное значение пиксельной частоты, а степень ее зависимо-

сти от параметров. В рассматриваемом случае интерес представляет именно предельно реализуемая производительность для каждого значения аргумента, поэтому с целью поиска написан скрипт для САПР (рис. 4).

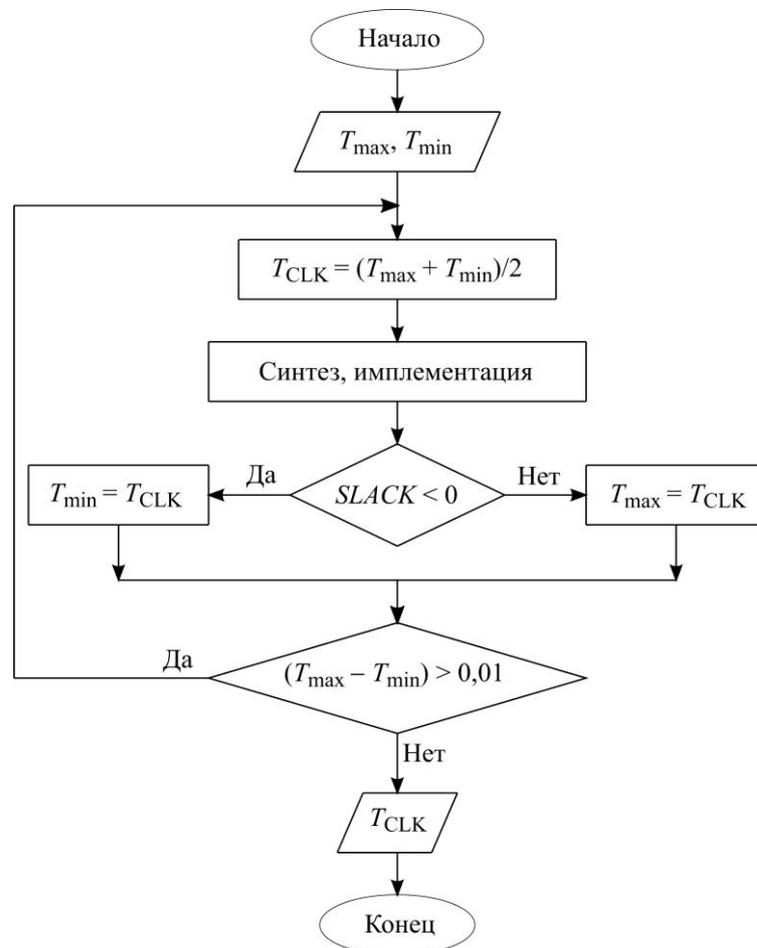


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска периода входного тактового сигнала
 Fig. 4. Block diagram of the algorithm for searching the period of the input clock signal

Из блок-схемы на рис. 4 видно, что в качестве критерия оценки результата используется переменная *SLACK*, вычисляемая как разница между заданным периодом тактового сигнала и временем максимальной задержки распространения. В качестве входных данных принимаются T_{\max} и T_{\min} , определяемые таким образом, чтобы ожидаемый результат находился внутри диапазона. Для каждой итерации при сокращении вдвое полученный интервал до заданного минимального значения необходимо условие, когда при $T_{\text{CLK}} = T_{\min}$ переменная *SLACK* должна быть отрицательной, а при $T_{\text{CLK}} = T_{\max}$ – положительной. На основе полученного результата T_{CLK} при изменении параметров схемы вычисляется набор частот $F_{\text{CLK}} = 1/T_{\text{CLK}}$.

Как правило, разрядность пикселей в стандартном представлении ограничена и имеет определенные значения 8, 10, 12, 14 для монохромных изображений и 24 для цветного изображения RGB888. Все значения входят в максимальную разрядность базового модуля BRAM для используемого семейства, равную 32. Как следствие, влияние на производительность не оказывается (рис. 5, а). Незначительный разброс может быть обусловлен несовершенством алгоритмов имплементации, а также тем, что значение остаточного запаса *SLACK* не учитывается. Отметим, что для частот менее 310 МГц погрешность для пара-

метра T_{CLK} , определенного в теле алгоритма и равного 0,01 нс, и параметра F_{CLK} не превышает 1 МГц и, следовательно, почти не оказывает влияния на конечный результат. В результате имплементации для фиксированной высоты, равной 2, в диапазоне ширины от 2 до 160 влияние данного параметра на производительность отсутствует (рис. 5, б).

Зависимость частоты от высоты показывает локальное снижение максимальной производительности (рис. 5, в). Важным является тот факт, что такое изменение имеет нелинейный характер и не может ограничивать масштабируемость в силу минимального значения для предельного случая в условиях реализации максимального числа ресурсов ПЛИС. При сравнении зависимостей скоростей для разных аргументов, определяющих ширину и высоту, выявлены различия между ними. Ширина окна пропорциональна числу элементов триггеров, а высота пропорциональна блокам памяти BRAM, используемым в схеме.

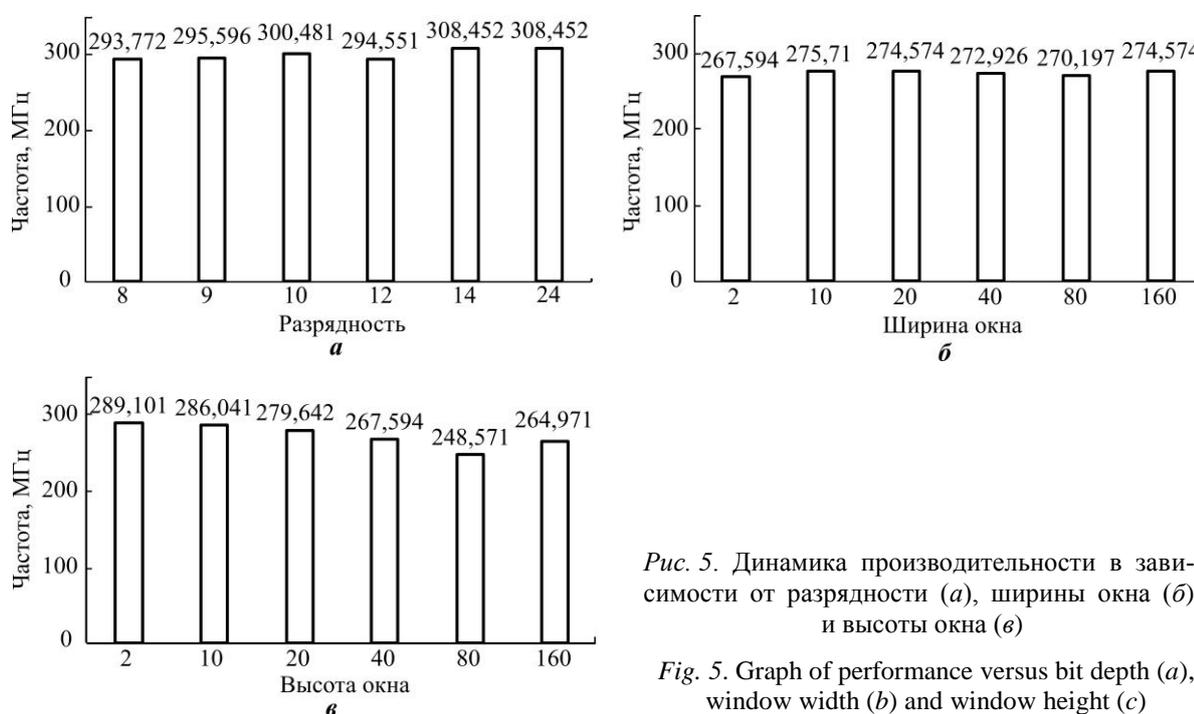
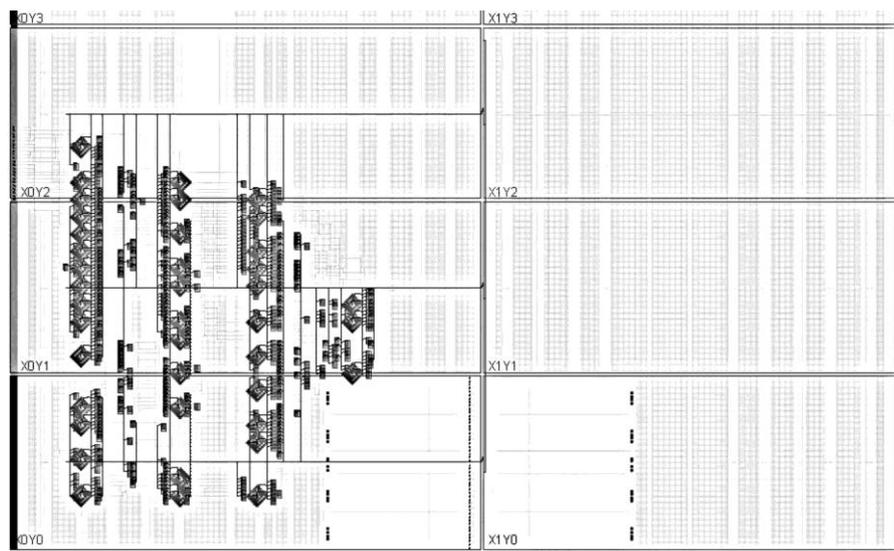


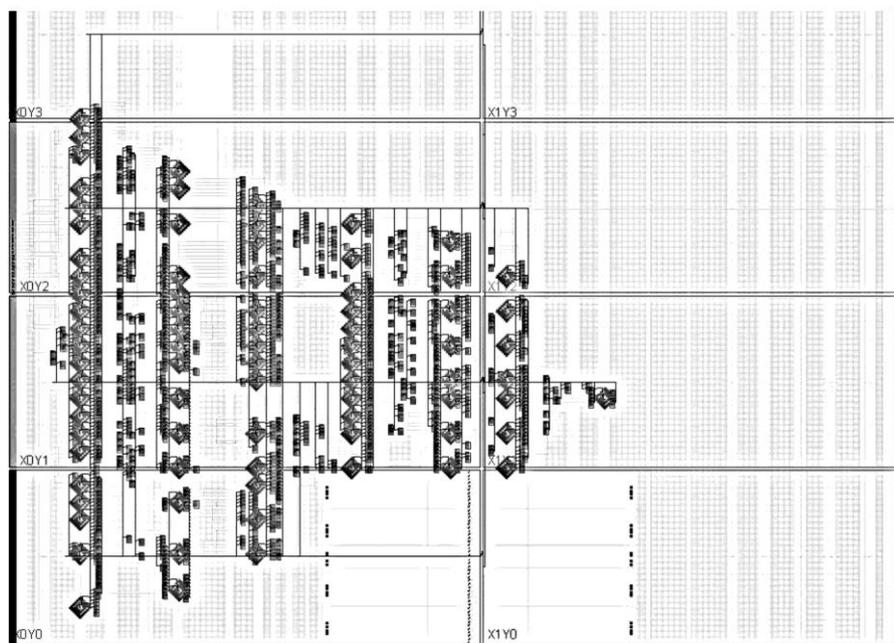
Рис. 5. Динамика производительности в зависимости от разрядности (а), ширины окна (б) и высоты окна (в)

Fig. 5. Graph of performance versus bit depth (a), window width (b) and window height (c)

Таким образом, помимо объективных факторов, определяемых схемой, таких как комбинационные задержки и количество нагрузочных элементов, на быстродействие влияет длина цепей, используемых в сигналах линий данных и частоты. Последнее, в свою очередь, строго связано с физическим расположением модулей, входящих в схему. В частности, блоки памяти имеют большее расстояние от источника тактового сигнала, располагающегося в центре ПЛИС, в отличие от логических элементов с триггерами. При сравнении автоматического размещения элементов схемы для случаев, когда количество BRAM равно 40 и 80, наблюдается вынужденный рост общей длины линии тактового сигнала, который в частном случае может приводить к незначительному росту задержек (рис. 6). Из анализа результатов очевидно, что линейный рост используемых ресурсов не влечет за собой пропорционального снижения производительности для полученной схемы.



a



b

Рис. 6. Распределение схемы в зависимости от используемых BRAM:
a – высота, равная 40; *b* – высота, равная 80
 Fig. 6. Implementation of the scheme, depending on the used BRAM:
a – height 40; *b* – height 80

С учетом того что предлагаемый модуль по своему замыслу является элементом, входящим в состав более сложной системы, необходимо рассмотреть ситуацию, при которой зона его размещения ограничена и, как следствие, количество ресурсов конечно и фиксировано. Фактически в таких условиях предельные параметры синтезируемой схемы выборки хранения зависят исключительно от выбранной области. Анализируя зависимость производительности при изменении размеров в подобных условиях, следует отметить его практическое и значимое влияние на конечный результат (рис. 7).

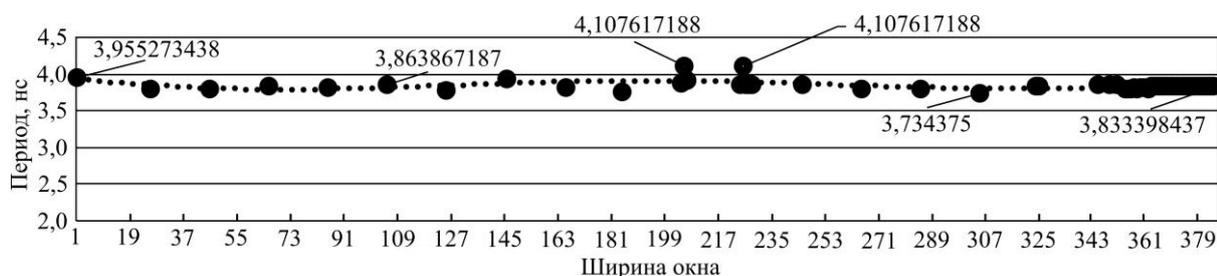


Рис. 7. Зависимость производительности от изменения ширины окна в условиях ограничения области ресурсов: ● период; полиномиальная (период)

Fig. 7. Performance dependency with changing the window width in terms of limited resource area: ● period; polinomial (period)

Рассмотрим размещение модуля сдвигового окна при условии его локализации в ограниченной области (рис. 8). Количество строк равно 80 и не меняется. Можно наблюдать полное заполнение всей рабочей области. Показанный результат достигнут при ширине окна, равной 385. Увеличение этого числа до 386 приводит к невозможности размещения схемы из-за недостатка ресурсов. В результате получаем систему, производительность которой практически не зависит от ее размера, а обусловлена архитектурой. Для ПЛИС различных семейств, таких как Artix-7 (xc7a200tsg484-1), Kintex-7 (xc7k325tbg900-1), Virtex-7 (xc7v585tffg1157-1), для ширины 40/80 полученные значения частоты попарно соответствуют значениям 263,992 МГц / 262,398 МГц, 356,506 МГц / 358,423 МГц, 357,526 МГц / 357,526 МГц.

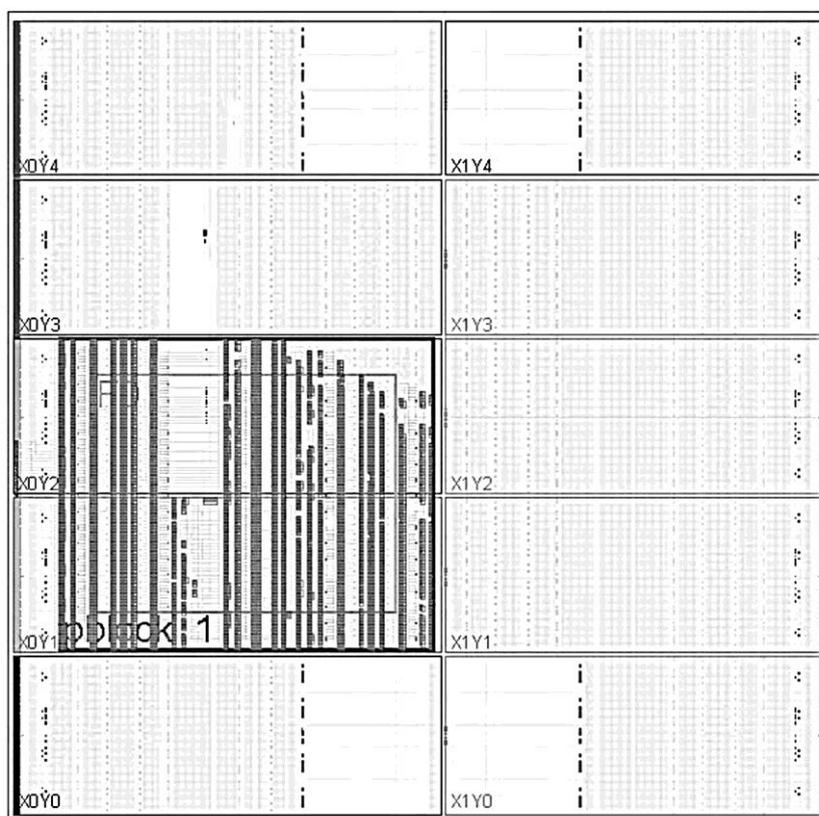


Рис. 8. Реализация схемы доступа в ограниченной области ПЛИС
 Fig. 8. Implementation of the access scheme in a limited area of the FPGA

Заключение. Разработанная ПЛИС-система применима в качестве базовой при использовании в составе аппаратных блоков большого числа алгоритмов потоковой обработки и не является проблемой для конечной системы, в которой необходимо использовать различные алгоритмы, требующие оконного доступа к кадру.

Литература

1. *Morales E., Herrera R.* Video processing in real-time in FPGA // Proc. SPIE. Optics and Photonics for Information Processing XII. 2018. Vol. 10751. Art. ID: 107510Z. <https://doi.org/10.1117/12.2322021>
2. FPGA-based research on high frame rate infrared image real-time acquisition and processing system / *S. He, Y. Zhou, S. Lin et al.* // Proc. SPIE. Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application 2020. 2021. Vol. 11763. Art. ID: 117632T. <https://doi.org/10.1117/12.2586419>
3. *Nian T.-K., Chondro P., Ruan S.-J.* A low complexity detection method for video data discontinuity implemented on SoC-FPGA by using pixel location prediction scheme // *Multimed. Tools Appl.* 2020. Vol. 79. P. 22261–22276. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09021-2>
4. *Шариков А. И., Шарикова Е. М.* ПЛИС-система выделения ключевых точек при обработке изображений // *Изв. вузов. Электроника.* 2018. Т. 23. № 5. С. 495–501. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-5-495-501>
5. *Kumar A., Zhang Z. J., Lyu H.* Object detection in real time based on improved single shot multi-box detector algorithm // *J. Wireless Com. Network.* 2020. Vol. 2020. Art. No. 204. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01826-x>
6. A real-time object detection algorithm for video / *S. Lu, B. Wang, H. Wang et al.* // *Computers & Electrical Engineering.* 2019. Vol. 77. P. 398–408. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.05.009>
7. *Batra V., Kilgard M. J., Kumar H., Lorach T.* Accelerating vector graphics rendering using the graphics hardware pipeline // *ACM Transactions on Graphics.* 2015. Vol. 34. Iss. 4. Art. No. 146. <https://doi.org/10.1145/2766968>
8. GPU acceleration of the most apparent distortion image quality assessment algorithm / *J. Holloway, V. Kannan, Y. Zhang et al.* // *J. Imaging.* 2018. Vol. 4. Iss. 10. Art. No. 111. <https://doi.org/10.3390/jimaging4100111>
9. *Zhang Y., Yang X., Wu L., Andrian J. H.* A case study on approximate FPGA design with an open-source image processing platform // 2019 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI). Miami, FL: IEEE, 2019. P. 372–377. <https://doi.org/10.1109/ISVLSI.2019.00074>
10. SMPTE ST 2110 compliant scalable architecture on FPGA for end to end uncompressed professional video transport over IP networks / *N. Ranasinghe, R. Bangamuarachchi, J. Seneviratne et al.* // 2019 IEEE 30th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP). New York, NY: IEEE, 2019. P. 235–238. <https://doi.org/10.1109/ASAP.2019.00012>

Статья поступила в редакцию 26.10.2022 г.; одобрена после рецензирования 08.11.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Шариков Антон Игоревич – инженер-электроник кафедры вычислительной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tohan757@yandex.ru

Шарикова Елена Михайловна – инженер-электроник НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ellenasharikova@gmail.com

References

1. Morales E., Herrera R. Video processing in real-time in FPGA. *Proc. SPIE. Optics and Photonics for Information Processing XII*, 2018, vol. 10751, art. ID: 107510Z. <https://doi.org/10.1117/12.2322021>
2. He S., Zhou Y., Lin S., Chang H., Wei X. FPGA-based research on high frame rate infrared image real-time acquisition and processing system. *Proc. SPIE. Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application 2020*, 2021, vol. 11763, art. ID: 117632T. <https://doi.org/10.1117/12.2586419>
3. Nian T.-K., Chondro P., Ruan S.-J. A low complexity detection method for video data discontinuity implemented on SoC-FPGA by using pixel location prediction scheme. *Multimed. Tools Appl.*, 2020, vol. 79, pp. 22261–22276. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09021-2>
4. Sharikov A. I., Sharikova E. M. FPGA system of image key points detecting. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 5, pp. 495–501 (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-5-495-501>
5. Kumar A., Zhang Z. J., Lyu H. Object detection in real time based on improved single shot multi-box detector algorithm. *J. Wireless Com. Network.*, 2020, vol. 2020, art. no. 204. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01826-x>
6. Lu S., Wang B., Wang H., Chen L., Linjian M., Zhang X. A real-time object detection algorithm for video. *Computers & Electrical Engineering*, 2019, vol. 77, pp. 398–408. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.05.009>
7. Batra V., Kilgard M. J., Kumar H., Lorach T. Accelerating vector graphics rendering using the graphics hardware pipeline. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, vol. 34, iss. 4, art. no. 146. <https://doi.org/10.1145/2766968>
8. Holloway J., Kannan V., Zhang Y., Chandler D. M., Sohoni S. GPU acceleration of the most apparent distortion image quality assessment algorithm. *J. Imaging*, 2018, vol. 4, iss. 10, art. no. 111. <https://doi.org/10.3390/jimaging4100111>
9. Zhang Y., Yang X., Wu L., Andrian J. H. A case study on approximate FPGA design with an open-source image processing platform. *2019 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)*. Miami, FL, IEEE, 2019, pp. 372–377. <https://doi.org/10.1109/ISVLSI.2019.00074>
10. Ranasinghe N., Bangamuarachchi R., Seneviratne J., Jayawardane A., Pasqual A., Senarath R. M. A. U. SMPTE ST 2110 compliant scalable architecture on FPGA for end to end uncompressed professional video transport over IP networks. *2019 IEEE 30th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*. New York, NY, IEEE, 2019, pp. 235–238. <https://doi.org/10.1109/ASAP.2019.00012>

The article was submitted 26.10.2022; approved after reviewing 08.11.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Anton I. Sharikov – Hardware Engineer of the Computer Engineering Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tohan757@yandex.ru

Elena M. Sharikova – Hardware Engineer of the Research Institute of Computing and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ellenasharikova@gmail.com

Методика идентификации параметров Spice-моделей КМОП-микросхем по температурным зависимостям их динамических характеристик

С. В. Шумарин, Т. Н. Фролова, А. М. Богачев

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

bogachev-al2012@yandex.ru

Аннотация. Отсутствие верифицированных Spice-моделей КМОП-микросхем в условиях дестабилизирующих воздействий (температурных, радиационных, механических и др.) является одной из проблем Spice-моделирования. Уточнением моделей занимается либо фирма-подрядчик по заказу производителя кристаллов, либо разработчик электронной аппаратуры. В работе предложена методика оперативной параметрической идентификации Spice-моделей КМОП-микросхем, рассмотрены идентификационные параметры моделей, критерии их выбора, критерии выбора диапазонов изменения идентификационных параметров. Приведен пример использования предложенной методики для идентификации параметров модели микросхемы 1564JE1. Апробация предлагаемой методики выполнена индивидуально для трех образцов микросхем 1564JE1 из разных партий с применением экспериментальных данных, полученных с помощью кольцевого генератора в диапазоне температур. Предложены формулы поправочных коэффициентов для модели интегральной схемы, позволяющие уточнить ее параметры без использования итерационных алгоритмов. Исследования показали, что применение предложенной методики идентификации позволяет повысить точность моделирования.

Ключевые слова: Spice-модель, моделирование, интегральная схема, кольцевой генератор

Для цитирования: Шумарин С. В., Фролова Т. Н., Богачев А. М. Методика идентификации параметров Spice-моделей КМОП-микросхем по температурным зависимостям их динамических характеристик // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 212–221. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-212-221>

Original article

Technique for identification of CMOS ICs Spice models parameters by temperature dependences of their dynamic characteristics

S. V. Shumarin, T. N. Frolova, A. M. Bogachev

Vladimir State University, Vladimir, Russia

bogachev-al2012@yandex.ru

Abstract. One of the important Spice simulation issues is the lack of verified Spice models of ICs under conditions of destabilizing influences: temperature, radiation, mechanical, and others. The models are refined either by the contracting firm commissioned by the crystal manufacturer, or by the electronic equipment developer himself. In this work, a technique for the operational parametric identification of CMOS ICs Spice models is proposed, and the models' identification parameters, their selection criteria and identification parameters variation range selection criteria are considered. An example of the proposed technique application for the 1564LE1 microcircuit model parameters identification is given. Approbation of the proposed technique was carried out individually for three samples of 1564LE1 microcircuits from different production batches on experimental data obtained using a ring generator in the temperature range. Formulas for IC model correction factors have been proposed, allowing its parameters refinement without the use of iterative algorithms. Studies have shown that the use of the proposed identification technique makes it possible to improve the simulation accuracy.

Keywords: Spice model, simulation, integrated circuit, ring oscillator

For citation: Shumarin S. V., Frolova T. N., Bogachev A. M. Technique for identification of CMOS ICs Spice models parameters by temperature dependences of their dynamic characteristics. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 212–221. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-212-221>

Введение. Главная проблема Spice-моделирования – отсутствие верифицированных моделей компонентов, в частности микросхем, работающих в температурных, радиационных, механических и других дестабилизирующих условиях. Как правило, производители электронной компонентной базы предоставляют необходимый комплект Spice-моделей, предназначенных для эксплуатации только в нормальных условиях. Уточнением Spice-моделей полупроводниковой электронной компонентной базы, работающих в экстремальных условиях, занимается либо фирма-подрядчик по заказу производителя кристаллов, либо сам разработчик электронной аппаратуры при пополнении своего ограниченного перечня комплектующих компонентов. При этом обычно структура модели не изменяется, проводится ее параметрическая идентификация на основе результатов экспериментов с выборкой из партии исследуемых микросхем в реальных условиях эксплуатации.

Цифровые микросхемы в основном изготавливаются по КМОП-технологии. Их Spice-модели состоят из двух частей: списка соединений (S1) и библиотеки моделей

элементов (S2) [1, 2]. Список соединений представляет собой схему соединения базовых элементов и внешних цепей, реализующих функции электронной компонентной базы. Библиотеки моделей используются для задания расширенных параметров стандартных моделей, заложенных в Spice-симулятор, и при необходимости для описания нестандартных моделей элементов микросхем. Моделями КМОП-компонентов являются компактные модели МОП-транзисторов разного уровня, включенные в математическое ядро Spice-симулятора [3, 4]. Уровень сложности структуры моделей КМОП-микросхем определяет разработчик на основе компромисса между необходимой точностью, требуемыми вычислительными ресурсами, условиями производства и применения. Параметры Spice-моделей КМОП-микросхем определяются схемой соединений (S1) [5] или библиотекой моделей элементов (S2). Отсутствие искажений форм выходных сигналов в температурных условиях эксплуатации обеспечивается уточнением Spice-параметров только на основе библиотеки моделей элементов (S2). Актуальным является разработка методики оперативной параметрической идентификации Spice-моделей микросхем на основе библиотечного описания элементов (S2).

Выбор идентификационных параметров. Для реализации методики оперативной идентификации необходимо выбрать наиболее эффективные Spice-параметры по их влиянию на динамические характеристики КМОП-микросхем с учетом температуры эксплуатации. При этом следует учитывать технологические разбросы характеристик исследуемых микросхем.

Динамические процессы КМОП-микросхем определяются временем распространения сигналов. Время задержки сигнала зависит от напряжения источника питания, пороговых напряжений включения n - и p -канальных МОП-транзисторов, подвижности носителей заряда (электронов и дырок) в каналах МОП-структур, емкости подзатворных областей, суммарной емкости нагрузки [6].

Подвижность относится к основным параметрам МОП-транзистора, имеющим сильную зависимость от температуры. Подвижность носителей заряда в канале значительно меньше объемной подвижности электронов μ_n и дырок μ_p . В кремнии $\mu_n = 1350 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $\mu_p = 480 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Для электронов значения дрейфовой подвижности носителей заряда в канале находятся в диапазоне $300\text{--}700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, для дырок – в диапазоне $100\text{--}300 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [7]. Уменьшение поверхностной подвижности в 2–3 раза обусловлено ограничением области перемещения носителей заряда тонким инверсным слоем от границы раздела кремний – диоксид кремния. Носители прижимаются эффективным полем, зависящим от заряда обедненной области в объеме полупроводника и заряда в инверсном слое, к границе раздела, и их рассеяние возрастает. Подвижность носителей в объеме полупроводникового кристалла определяется преимущественно их рассеянием на тепловых колебаниях решетки и ионизированных примесях. Подвижность носителей в канале определяется механизмами рассеяния на ионизированных примесях и других заряженных дефектах (заряженных поверхностных состояниях и заряженных ловушках в объеме SiO_2), на несовершенствах поверхности раздела кремния с окислом и на колебаниях ионов решетки (фононах). Механизм рассеяния на заряженных центрах существенен только в подпороговом режиме. В надпороговом режиме подвижность определяется рассеянием на фононах и несовершенствах границы раздела. Подвижность в МОП-транзисторах имеет сложную температурную зависимость, определяемую взаимодействием различных механизмов рассеяния носителей. Наибольшее влияние на температурную зависимость подвижности в надпороговом режиме оказывает усиливающееся с ростом температуры рассеяние на объемных и приграничных фононах [7].

Основным фактором, ограничивающим быстродействие МОП-транзистора, является наличие паразитных емкостей в его структуре. Наибольшее влияние на инерционные свойства МОП-транзистора оказывают емкости перекрытия областей затвор – исток и затвор – сток, барьерные емкости истокового и стокового электронно-дырочных переходов. Величина подвижности носителей заряда, наличие и величина паразитных емкостей отражают особенности конструктивно-технологического исполнения микросхемы. На погрешность электрофизических характеристик микросхемы влияет большое количество факторов: контролируемых, плохо контролируемых, неконтролируемых. Качество микросхем (процент выхода годных микросхем) определяется техническим уровнем технологии на предприятии. Технологический разброс значений параметров рассматриваемых микросхем может достигать $\pm 30\%$ [8].

Подвижность и паразитные емкости МОП-транзисторов входят в набор «подгоночных» параметров, изменение которых позволит получить наилучшее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. Таким образом, для реализации идентификации динамических характеристик Spice-моделей КМОП-микросхем выбраны следующие параметры:

- подвижность (UO);
- удельная емкость донной части перехода подложки при нулевом смещении (CJ);
- коэффициент распределения донной части перехода подложки (MJ);
- емкость перекрытия затвор – исток на метр ширины канала ($CGSO$);
- емкость перекрытия затвор – сток на метр ширины канала ($CGDO$).

Предварительные исследования показали более значимое влияние подвижности на время переключения МОП-транзисторов, поэтому в дальнейшем в качестве основного идентифицирующего параметра будет использоваться подвижность, а в качестве дополнительного – указанные емкостные параметры, объединенные общим поправочным коэффициентом.

Методика проведения параметрической идентификации Spice-параметров. Необходимо найти такие оптимальные значения параметров модели, чтобы минимизировать расхождение между динамическими параметрами образцов микросхем в диапазоне температур, полученными экспериментально и в результате моделирования.

Исходные данные: образцы КМОП-микросхем (образцы № 1, 2, 3); Spice-модели этих микросхем, включающие в себя список соединений элементов микросхемы (модели 1, 2, 3) и библиотеку расширенных параметров этих элементов, включающих в себя модели МОП-транзисторов BSIM 3; графические зависимости динамических характеристик микросхем в температурном диапазоне, полученные экспериментально и в результате Spice-моделирования.

Введем следующие ограничения: значения идентифицируемых параметров не должны искажать форму сигнала при моделировании; в процессе идентификации параметров модели изменяются только параметры компактных моделей транзисторов из библиотеки (S2); значения идентифицируемых параметров не должны выходить за технологический разброс.

Перечислим этапы проведения параметрической идентификации.

1. Построить графики зависимостей динамических характеристик (частот, длительностей фронтов сигналов и т. п.) в температурном диапазоне эксплуатации по экспериментальным данным и результатам моделирования.

2. Построить линейные регрессии для экспериментальной и расчетной температурных зависимостей.

3. Определить разность между соответствующими коэффициентами уравнений линейных регрессий.

4. Предусмотреть учет двух поправочных коэффициентов для подвижности (UO) с целью смещения графической температурной зависимости по оси частот и емкостей (CJ , MJ , $CGSO$, $CGDO$) с целью изменения угла наклона.

5. Провести полный факторный эксперимент с имеющейся Spice-моделью и определить математические модели зависимости частоты от введенных поправочных коэффициентов. При необходимости возможна корректировка зависимости емкостей p - n -переходов от температуры с помощью Spice-параметра $TEMP$.

6. Ввести полученные математические выражения в файл Spice-модели.

7. Внести коэффициенты линейных регрессий из п.2 в файл модели и провести итоговое моделирование.

8. Оценить результаты параметрической идентификации.

Предлагаемую методику можно распространить на различные виды КМОП-микросхем стандартной логики, так как она предполагает поиск и изменение параметров модели, влияющих на динамические параметры микросхем, в пределах технологического разброса.

Пример использования методики идентификации параметров модели. Апробация предлагаемой методики выполнена на базе параметрической идентификации Spice-модели КМОП-микросхемы 1564JE1 [9, 10]. В результате оптимизации описание модели дополнено поправочными коэффициентами для параметров подвижности носителей заряда и емкостей p - n -переходов. Апробация методики также выполнена индивидуально для трех образцов микросхем 1564JE1 из разных партий.

Экспериментальная зависимость динамических характеристик микросхемы 1564JE1 от температуры получена с помощью кольцевого генератора. Схема макета кольцевого генератора с нагрузкой представлена на рис. 1. Кольцевой генератор состоит из трех логических элементов, четвертый используется в качестве буфера, элементы $R1$ и $C1$ – нагрузка, эквивалентная входу осциллографа, $G1$ – источник питания напряжением +5 В, $DD1$ – интегральная схема 1564JE1.

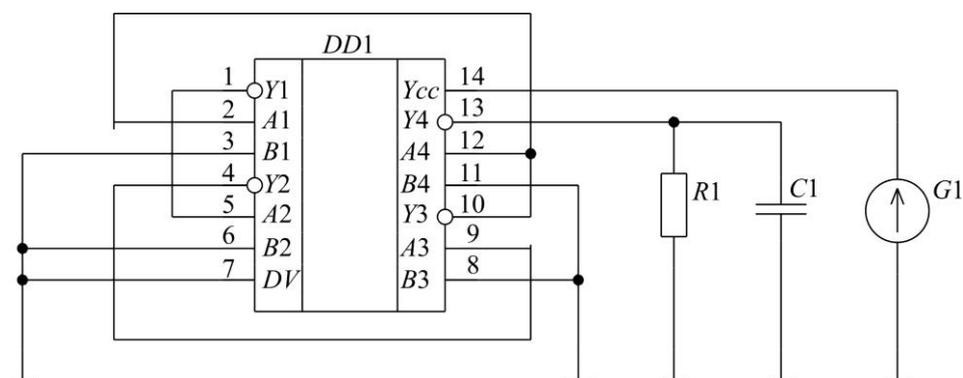


Рис. 1. Схема кольцевого генератора с буфером
Fig. 1. Circuit diagram of the ring oscillator with a buffer

В ходе эксперимента определены зависимости частоты автоколебаний установившегося режима генерации для трех образцов в диапазоне температур от -60 до $+60$ °С. Использованы осциллограф АКИП-4115/7А и камера тепла и холода Thermotron S-1.2-3200. Моделирование схемы кольцевого генератора проведено в САПР Mentor Graphics Xpedition. Зависимость частоты автоколебаний от температуры, полученная экспериментально и в результате моделирования, представлена на рис. 2.

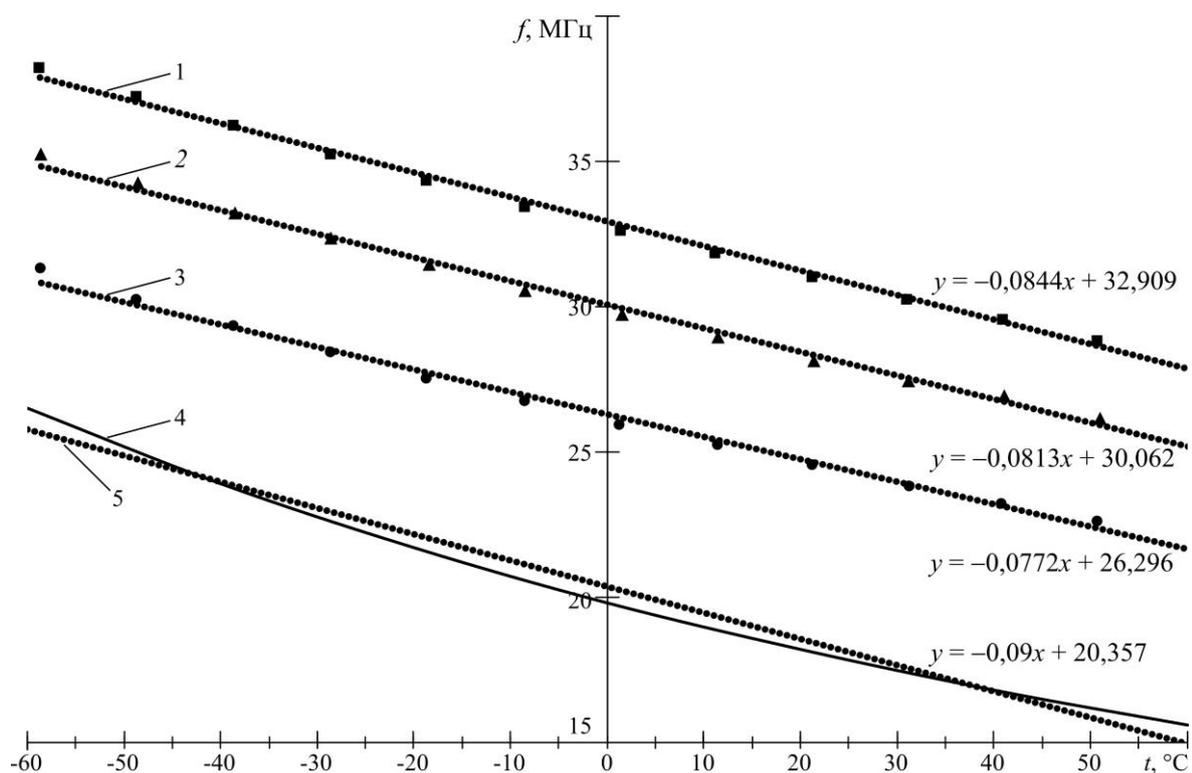


Рис. 2. Зависимость частоты автоколебаний кольцевых генераторов от температуры, полученная экспериментально и в результате моделирования с использованием исходной Spice-модели, и соответствующие линии регрессии: 1 – линейная регрессия (образец № 2); 2 – линейная регрессия (образец № 3); 3 – линейная регрессия (образец № 1); 4 – исходная модель; 5 – линейная регрессия (исходная модель)
 ■ – образец № 2; ▲ – образец № 1; ● – образец № 3

Fig. 2. Dependences of the frequencies of self-oscillations of a ring oscillator on temperature, obtained experimentally for three samples and by modeling, supplemented by regression lines: 1 – linear regression (sample No. 2); 2 – linear regression (sample No. 3); 3 – linear regression (sample No. 1); 4 – initial model; 5 – linear regression (initial model); ■ – sample No. 2; ▲ – sample No. 1; ● – sample No. 3

Как видно из рис. 2, погрешность результатов моделирования находится в диапазоне от 20 % (для образца № 1) до 40 % (для образца № 2) и увеличивается с ростом температуры. Для каждой из трех экспериментальных зависимостей, а также ветви моделирования строятся линейные регрессии $y = ax + b$.

Математические модели поправочных коэффициентов для подвижности и емкостей получены полным факторным экспериментом. Ограничением является отсутствие искажений выходного сигнала в рассматриваемом температурном диапазоне. Варьируемый диапазон значений подвижности и емкости также ограничен технологическим разбросом. Для определения поправочного коэффициента подвижности KOU проведен однофакторный эксперимент. Исходные данные для него получены в результате моделирования с изменяемой Spice-моделью. Варьируемый фактор – коэффициент подвижности, целевая функция – разность частот в середине рассматриваемого интервала (0 °C), которая должна стремиться к минимуму. Форма полученной математической модели представляет собой квадратичный полином. Поправочный коэффициент емкости рассчитан аналогично на основе двухфакторного эксперимента. Факторами являются коэффициенты подвижности и емкостей, варьированием которых необходимо обеспечить минимизацию целевой функции – разности тангенсов угла наклона линейных регрессий.

В результате вычислительного эксперимента получены квадратичная зависимость коэффициент подвижности KOU от разности частот в середине температурного диапазона и линейная зависимость емкостного коэффициента $KOEF$ от разностей тангенсов углов наклона линий регрессий, разности частот и температуры:

$$KOU = 5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta b^2 + 6 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta b + 1, \quad (1)$$

$$KOEF = 1 + (3,83 \cdot \Delta b - 111,62) \cdot \Delta \alpha \cdot \frac{TEMP}{1000}, \quad (2)$$

где $\Delta b = f_{0_exp} - f_{0_model}$; $\Delta \alpha = \alpha_{exp} - \alpha_{model} \cdot (1 + \Delta b / f_{0_model})$; f_{0_exp}, f_{0_model} – частота автоколебания при 0 °С, полученная экспериментально и в результате моделирования соответственно, МГц; $\alpha_{exp}, \alpha_{model}$ – тангенс угла наклона уравнения регрессии экспериментальных значений и результатов моделирования соответственно; $TEMP$ – температура во время эксперимента, °С.

Для проведения параметрической идентификации Spice-модели микросхемы 1564LE1 в текстовый файл библиотеки расширенных параметров внесены коэффициенты уравнений регрессии, математические выражения (1) и (2), формулы для расчета значений параметров подвижности и емкостей. Внесенные в Spice-модель изменения для одного образца приведены в таблице. Внесенные изменения для других образцов отличаются только числами в первой и третьей строках, в которых указаны коэффициенты линий регрессий, описывающих экспериментальные данные конкретных образцов (см. рис. 2).

Изменения в Spice-модели микросхемы Changes in the Spice model

Дополнительные строки	Измененные строки
.PARAM Aexp = -0.0813 .PARAM Amodel = -0.09 .PARAM f0exp = 29.7 .PARAM f0model = 19.8	.MODEL NCH NMOS LEVEL=3 + UO={ KOU*370} + CJ={ KOEF*(6e-04)} + MJ={0.5+(1.0-KOEF)/2} + CGSO={ KOEF*(4e-10)} + CGDO={ KOEF*(4e-10)}
.PARAM deltaB = {f0exp-f0model} .PARAM deltaA = {Aexp-Amodel*(1+deltaB/f0model)} .PARAM RATIO = {(3.83*deltaB-111.62)*deltaA} .PARAM KOEF = {1.0+RATIO*TEMP/1000} .PARAM KOU = {deltaB*deltaB*5E-4 + deltaB*6.0E-2 + 1.0}	.MODEL PCH PMOS LEVEL=3 + UO={ KOU*153} + CJ={ KOEF*(5e-04)} + MJ={0.5+(1.0-KOEF)/2} + CGSO={ KOEF*(4e-10)} + CGDO={ KOEF*(4e-10)}

Результаты Spice-моделирования трех микросхем в температурном интервале показаны на рис. 3. Относительная погрешность результатов моделирования в области положительных температур не превышает 4 %, в области отрицательных температур – 0,5 %. Использование скорректированной модели не приводит к изменению переходного процесса и искажению формы сигнала кольцевого генератора (рис. 4).

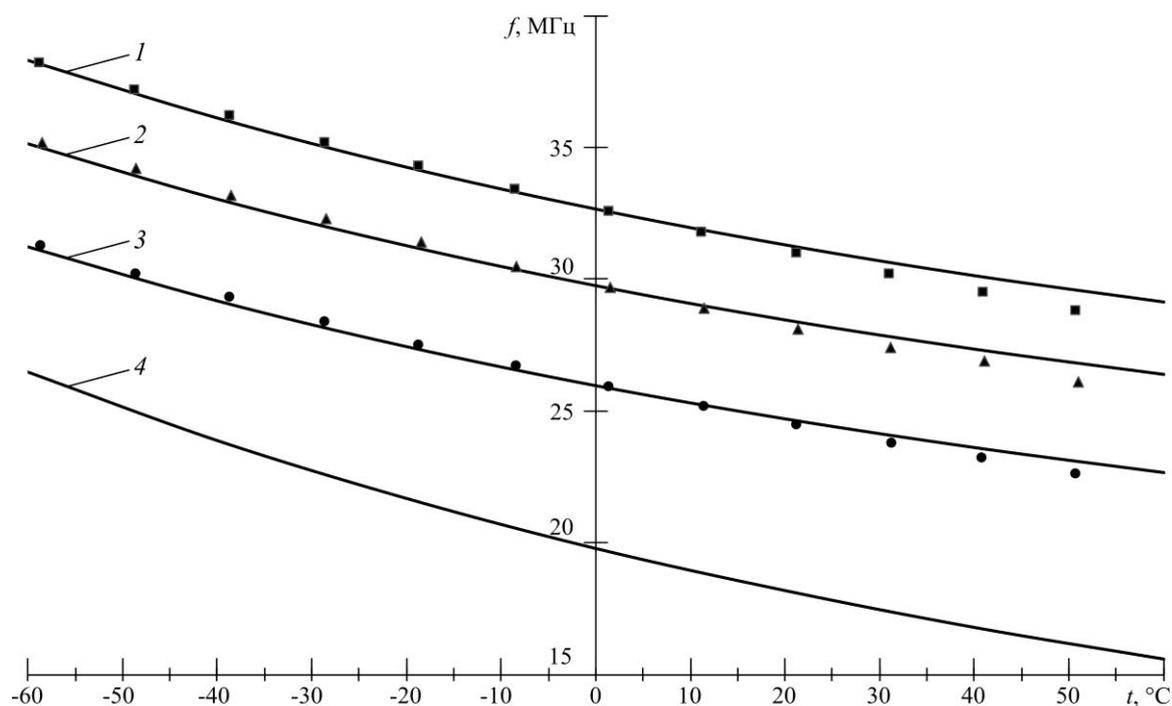


Рис. 3. Зависимость частоты автоколебаний кольцевых генераторов от температуры, полученная экспериментально и в результате моделирования на основе Spice-моделей с идентифицированными параметрами: 1 – модель 2; 2 – модель 3; 3 – модель 1; 4 – исходная модель; ■ – образец № 2; ▲ – образец № 3; ● – образец № 1

Fig. 3. Temperature dependences of the self-oscillation frequencies of three 1564LE1 microcircuits obtained by experiment and by modeling with identified parameters: 1 – model 2; 2 – model 3; 3 – model 1; 4 – initial model; ■ – sample No. 2; ▲ – sample No. 3; ● – sample No. 1

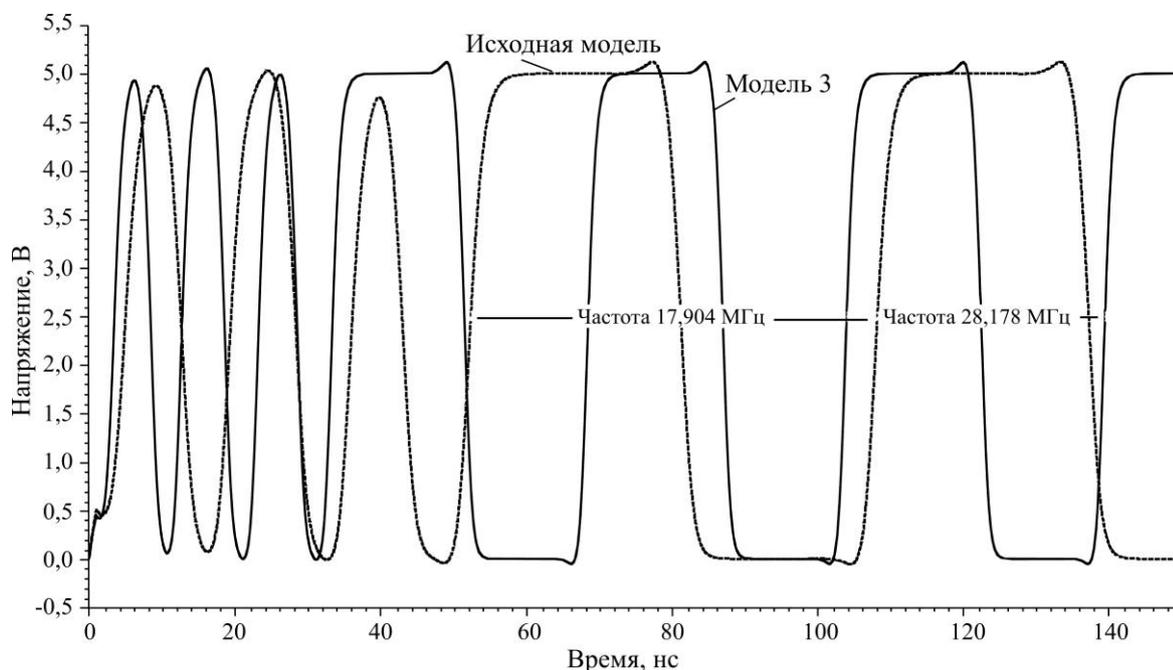


Рис. 4. Результаты моделирования выходного сигнала кольцевого генератора (модель 3) с исходной и измененной моделями

Fig. 4. Results of modeling the output signal of the ring oscillator (model 3) with the initial and modified models

Заключение. Для проведения параметрической идентификации Spice-моделей КМОП-микросхем по динамическим характеристикам оптимальными идентифицируемыми параметрами, оказывающими наиболее сильное влияние на быстродействие микросхем, являются подвижность носителей заряда и паразитные емкости МОП-структур.

Предлагаемая методика параметрической идентификации Spice-моделей КМОП-микросхем на основе компактных моделей транзисторов не требует итерационных алгоритмов и позволяет по температурным зависимостям динамических характеристик уточнить значения идентифицируемых Spice-параметров с учетом их технологических разбросов.

Методика апробирована на кольцевом генераторе на основе микросхемы 1564JE1. Результаты моделирования с уточненной Spice-моделью с малой погрешностью (не более 4 %) соответствуют эксперименту в температурном диапазоне от –60 до +60 °С. Применение предложенной методики позволяет на порядок сократить погрешность моделирования.

Литература

1. **Володин В. Я.** LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 389 с.
2. **Fitzpatrick D.** Analog design and simulation using OrCAD capture and PSpice. 2nd ed. Oxford: Newnes, 2017. 452 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01791-3>
3. BSIM3 model // BSIM Group [Электронный ресурс]. URL: <http://bsim.berkeley.edu/models/bsim3/> (дата обращения: 26.10.2022).
4. **Graaff H. C., Klaassen F. M.** Compact transistor modelling for circuit design. Vienna: Springer, 2012. XII, 351 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9043-2>
5. **Шумарин С. В., Богачев А. М.** Простой способ уточнения параметров SPICE-моделей ИС транзисторного уровня в температурном диапазоне // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 547–553. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-547-553>
6. **Soltani M., Khatib F., Seyyed Mahdavi Chabok S. J.** High-performance combined ring oscillators // COMPEL – Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng. 2020. Vol. 39. No. 3. P. 535–550. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2020-0039>
7. **Колосницын Б. С., Гапоненко Н. В.** Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем. Ч. 2: Расчет и проектирование полевых транзисторов. Минск: БГУИР, 2012. 96 с.
8. **Денисенко В.** Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2003. № 8 (34). С. 40–45.
9. ОАО «ОКБ «Экситон» [Электронный ресурс]. URL: <https://okbexiton.ru/> (дата обращения: 30.01.2023).
10. 1564JE1 ЭП: технические характеристики // ОАО «ОКБ «Экситон» [Электронный ресурс]. URL: <https://okbexiton.ru/pdf/mc1564le1.pdf> (дата обращения: 30.01.2023).

Статья поступила в редакцию 31.10.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.12.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Шумарин Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, 600014, г. Владимир, пр. Строителей, 3, стр. 7), sergey.shumarin@gmail.com

Фролова Тамара Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, 600014, г. Владимир, пр. Строителей, 3, стр. 7), frolova@vlsu.ru

Богачев Алексей Михайлович – аспирант кафедры электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, 600014, г. Владимир, пр. Строителей, 3, стр. 7), bogachev-al2012@yandex.ru

References

1. Volodin V. Ya. *LTspice: computer simulation of electronic circuits*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2010. 389 p. (In Russian).
2. Fitzpatrick D. *Analog design and simulation using OrCAD capture and PSpice*. 2nd ed. Oxford, Newnes, 2017. 452 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01791-3>
3. BSIM3 model. *BSIM Group*. Available at: <http://bsim.berkeley.edu/models/bsim3/> (accessed: 26.10.2022).
4. Graaff H. C., Klaassen F. M. *Compact transistor modelling for circuit design*. Vienna, Springer, 2012. xii, 351 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9043-2>
5. Shumarin S. V., Bogachev A. M. A simple method of transistor-level SPICE-models parameters fitting of integrated circuits in a temperature range. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 547–553. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-547-553>
6. Soltani M., Khatib F., Seyyed Mahdavi Chabok S. J. High-performance combined ring oscillators. *COMPEL – Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, 2020, vol. 39, no. 3, pp. 535–550. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2020-0039>
7. Kolosnitsyn B. S., Gaponenko N. V. *Semiconductor devices and elements of integrated circuits. Part 2. Calculation and design of field-effect transistors*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2012. 96 p. (In Russian).
8. Denisenko V. Transistor parameters scatter simulation in CMOS VLSI. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2003, no. 8 (34), pp. 40–45. (In Russian).
9. JSC “OKB “Exciton”. Available at: <https://okbexiton.ru/> (accessed: 30.01.2023).
10. 1564LE1 EP: technical characteristics. *JSC “OKB” Exciton*. (In Russian). Available at: <https://okbexiton.ru/pdf/mc1564le1.pdf> (accessed: 30.01.2023).

The article was submitted 31.10.2022; approved after reviewing 05.12.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Sergei V. Shumarin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronics, Instrumentation and Biotechnical Systems Department, Vladimir State University (Russia, 600014, Vladimir, Stroiteley ave., 3, bld.7), sergey.shumarin@gmail.com

Tamara N. Frolova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Electronics, Instrumentation and Biotechnical Systems Department, Vladimir State University (Russia, 600014, Vladimir, Stroiteley ave., 3, bld.7), frolova@vlsu.ru

Aleksei M. Bogachev – PhD student of the Electronics, Instrumentation and Biotechnical Systems Department, Vladimir State University (Russia, 600014, Vladimir, Stroiteley ave., 3, bld.7), bogachev-al2012@yandex.ru

Научная статья

УДК 681.586'326-184:531.768:53.042

doi:10.24151/1561-5405-2023-28-2-222-231

**Исследование возможностей повышения чувствительности
МЭМС-датчика давления емкостного типа
с мембранами различных геометрических форм**

Пью Вин Тун, Б. М. Симонов, С. П. Тимошенко

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

serborsel@mail.ru

Аннотация. МЭМС-датчики давления емкостного типа характеризуются высокой чувствительностью, малым энергопотреблением, устойчивостью к температурным воздействиям и имеют преимущества перед пьезорезистивными датчиками давления. Области применения МЭМС-датчиков постоянно расширяются, что обуславливает необходимость совершенствования их конструкторско-технологических вариантов реализации и анализа их возможностей. В работе исследованы чувствительные элементы (ЧЭ) емкостных МЭМС-датчиков для измерения давления ниже атмосферного с мембранами из кремния различных геометрических форм. В состав конструкции ЧЭ входит пара параллельных пластин, одна из которых – подвижная мембрана, а другая – фиксированный электрод прямоугольной формы. Выполнены расчеты деформаций и изменений емкости в ЧЭ МЭМС-датчика давления с мембранами разных геометрических форм. В программе COMSOL Multiphysics проведено моделирование ЧЭ МЭМС-датчиков с мембранами квадратной, круглой и прямоугольной форм. Толщина мембраны всех исследованных конструкций чувствительного элемента датчиков составляла 3 мкм, диапазон измеряемого давления – до 10 кПа. Рассчитаны значения чувствительности МЭМС-датчика давления с мембранами исследованных геометрических форм при воздействии давления. Установлено, что использование мембраны круглой формы обеспечивает максимальные деформации мембраны и изменения емкости в ЧЭ МЭМС-датчика давления при воздействии давления по сравнению с их изменениями в ЧЭ с мембранами других геометрических форм.

Ключевые слова: датчик давления емкостного типа, мембрана, чувствительный элемент, МЭМС

Для цитирования: Пью Вин Тун, Симонов Б. М., Тимошенко С. П. Исследование возможностей повышения чувствительности МЭМС-датчика давления емкостного типа с мембранами различных геометрических форм // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 222–231. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-222-231>

Original article

Investigation of the possibilities of increasing the sensitivity of a capacitive-type MEMS pressure sensor with membranes of various geometric shapes

Phyo Win Tun, B. M. Simonov, S. P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

serborsel@mail.ru

Abstract. Capacitive MEMS pressure sensors are characterized by high sensitivity, low power consumption, and resistance to temperature effects. They have gained advantages over piezoresistive pressure sensors and their area of application is constantly expanding, which necessitates the improvement of their design and technological implementation options and the study of the improvement feasibility. In this work, the sensitive elements (SE) of capacitive MEMS sensors for subatmospheric pressure measurement with silicon membranes of various geometric shapes are studied. The SE design includes a pair of parallel plates, the one of which is a movable membrane, and the other is a fixed rectangular electrode. Calculations of deformations and capacitance changes in SE of MEMS pressure sensor with membranes of different geometric shapes, and simulation of the SE of sensors with square, round and rectangular membranes using COMSOL Multiphysics program were performed. The membrane thickness of all studied designs of the SE of the sensors was 3 μm . The range of measured pressure is up to 10 kPa. The sensitivity values of the SE with membranes of the studied geometric shapes were calculated under pressure. It has been established that the use of a round membrane provides maximum membrane deformations and capacitance changes in the SE of MEMS pressure sensor when exposed to pressure in comparison with their changes in SE with membranes of other geometric shapes.

Keywords: capacitive pressure sensor, membrane, sensitive element, MEMS

For citation: Phyo Win Tun, Simonov B. M., Timoshenkov S. P. Investigation of the possibilities of increasing the sensitivity of a capacitive-type MEMS pressure sensor with membranes of various geometric shapes. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 222–231. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-222-231>

Введение. МЭМС-датчики давления емкостного и пьезорезистивного типов обеспечивают высокую чувствительность, низкое энергопотребление, отсутствие температурных эффектов, совместимость с ИС [1]. Основным недостатком пьезорезистивного МЭМС-датчика абсолютного давления – выраженная температурная зави-

симось пьезорезистивных коэффициентов [2]. Принцип действия емкостного МЭМС-датчика давления заключается в преобразовании дифференциального, гидростатического, избыточного или избыточно-вакуумметрического давления. Такие датчики обеспечивают низкий уровень шума, высокую чувствительность, имеют низкую температурную зависимость параметров, могут использоваться во многих новых высокопроизводительных приложениях и функционировать в условиях вибрационного воздействия [3]. В частности, емкостные МЭМС-датчики давления применяются в биомедицинских системах, в системах экологического мониторинга и управления производственными процессами [4].

В настоящей работе выполнены теоретический расчет и моделирование деформаций и изменений емкости в чувствительном элементе (ЧЭ) МЭМС-датчика давления емкостного типа с кремниевыми мембранами различных геометрических форм.

Постановка задачи. На рис. 1 схематически показан прогиб мембраны ЧЭ емкостного МЭМС-датчика под действием давления. На рис. 2 приведены трехмерные конструкции исследуемых кремниевых мембран емкостных МЭМС-датчиков давления различных геометрических форм со следующими параметрами. Ширина, длина, толщина подвижной мембраны и неподвижного электрода соответственно квадратной формы $500 \times 500 \times 3$ мкм; прямоугольной формы $700 \times 400 \times 3$ мкм; для мембран круглой формы диаметр 600 мкм и толщина 3 мкм. Для всех случаев зазор между подвижной мембраной и неподвижным электродам равен 8 мкм.

Физические свойства монокристаллического кремния: модуль упругости (модуль Юнга) $1,7 \cdot 10^7$ Н/см²; плотность 2,3 г/см³; теплопроводность 1,3 Вт/(см·К); тепловое расширение $2,6 \cdot 10^{-6}$ 1/К; коэффициент Пуассона 0,28.

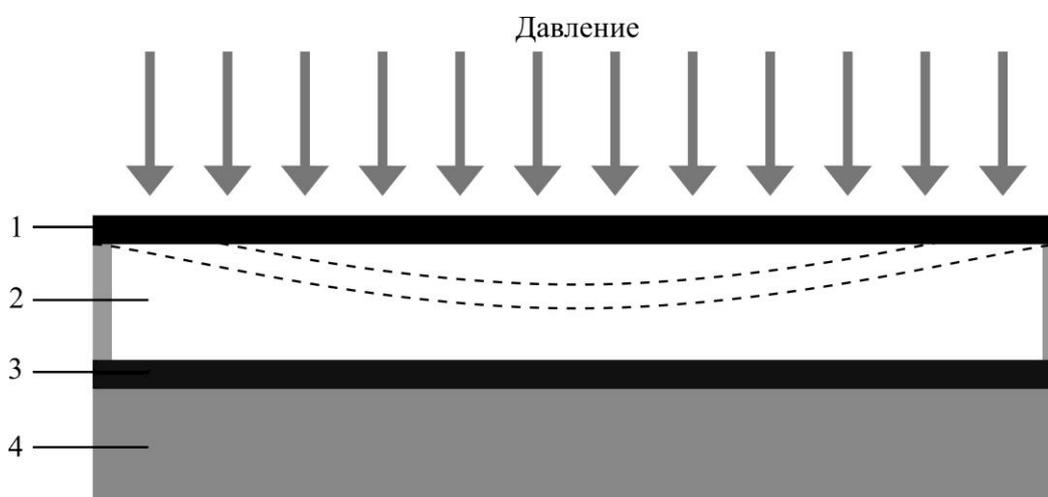


Рис. 1. Схематическое изображение ЧЭ МЭМС-датчика давления емкостного типа: 1 – мембрана; 2 – герметичная полость с вакуумом; 3 – неподвижный электрод; 4 – подложка [5]

Fig. 1. Schematic representation of the sensitive element of the capacitive-type MEMS pressure sensor: 1 – membrane; 2 – hermetic cavity with vacuum; 3 – fixed electrode; 4 – substrate [5]

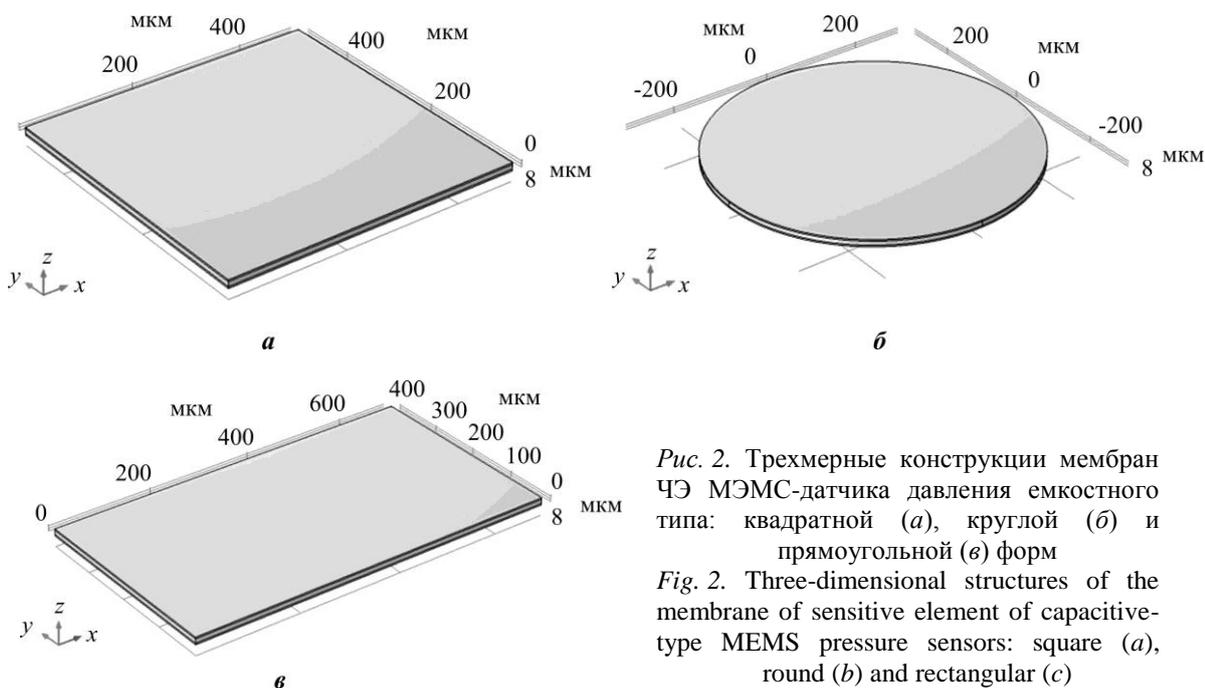


Рис. 2. Трехмерные конструкции мембран ЧЭ МЭМС-датчика давления емкостного типа: квадратной (а), круглой (б) и прямоугольной (в) форм
 Fig. 2. Three-dimensional structures of the membrane of sensitive element of capacitive-type MEMS pressure sensors: square (a), round (b) and rectangular (c)

Теоретический расчет. Максимальное отклонение мембран квадратной, круглой и прямоугольной форм при воздействии давления имеет место в центре мембраны. Согласно теории пластин Кригера прогиб пластин под действием давления, действующего нормально к поверхности пластины (мембраны), описывается основным дифференциальным уравнением для отклонения тонкой пластины [6, с. 95; 7]:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{P}{D},$$

где w – величина отклонения; P – давление; D – жесткость изгиба мембраны, которая определяется по формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}.$$

Максимальное отклонение в центре квадратной мембраны рассчитывается по формуле

$$W_{\max} = 0,01512(1-\nu^2) \frac{Pl^4}{Eh^3}.$$

Здесь ν – коэффициент Пуассона; P – действующее давление; l – длина мембраны; E – модуль упругости; h – толщина мембраны.

Максимальное отклонение в центре круглой мембраны можно определить из выражения

$$W_{\max} = \frac{Pr^4}{64D},$$

где r – радиус мембраны; D – жесткость изгиба мембраны.

Максимальное отклонение в центре прямоугольной мембраны равно:

$$W_{\max} = \alpha \frac{Pa^3}{D},$$
$$\alpha = 1,26 \cdot 10^{-3} \cdot 12(1-\nu^2),$$

где α – числовой коэффициент в зависимости от соотношения b/a или a/b ; a – половина длины мембраны; b – ширина мембраны.

Емкость между подвижным (деформируемым) и неподвижным электродами [6] описывается нелинейной зависимостью

$$C = \iint \frac{\varepsilon \varepsilon_0 dx dy}{d - w(x, y)},$$

где $\varepsilon = 1$ – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора; ε_0 – электрическая постоянная; d – начальная величина (до воздействия давления) зазора между электродами; $w(x, y)$ – общее отклонение центра; x, y – координаты, отсчитываемые от центра мембраны, взятого в качестве начала координат.

Метод биномиального разложения может быть использован для решения нелинейности. Последнее уравнение можно уточнить с помощью биномиального разложения:

$$C = C_0 \left(1 + \frac{12,5Pa^4}{2015dD} \right),$$

где C – текущее значение емкости, зависящее от давления; C_0 – начальная емкость (до действия давления).

Моделирование. В программе COMSOL Multiphysics выполнено моделирование трехмерной конструкции емкостного МЭМС-датчика давления, функционирующего в условиях вакуума. Установлено, что максимальное отклонение мембраны квадратной формы составляет 1,64 мкм, круглой формы – 2,29 мкм, прямоугольной формы – 1,32 мкм при воздействии на ЧЭ давления 10 кПа. Результаты расчета деформаций по площадям мембран исследованных форм при воздействии на них давления представлены на рис. 3, зависимости максимальных деформаций мембран различных форм от воздействующего на них давления – на рис. 4,а. Видно, что мембрана круглой формы обеспечивает получение наиболее высоких значений деформации по сравнению с деформациями мембран других форм, поэтому ее использование в конструкции ЧЭ МЭМС-датчика давления обеспечит его максимально высокую чувствительность.

При воздействии давления на датчик его мембрана деформируется (перемещается), в результате чего изменяется емкость между подвижным (на мембране) и неподвижным электродами, составляющими обкладки конденсатора. Очевидно, что чем больше величина деформации (перемещения) подвижной мембраны, тем меньше расстояние между обкладками, больше изменяется емкость и выше чувствительность датчика. Полученные значения отклонений (деформаций) мембран ЧЭ МЭМС-датчика давления использованы для расчета изменений емкости в ЧЭ под действием давления. На рис. 4, б представлены расчетные зависимости емкости между электродами ЧЭ с мембранами различных форм от давления. Видно, что использование мембраны круглой формы обеспечивает наиболее резкую зависимость изменения емкости между электродами по сравнению с аналогичными зависимостями для ЧЭ с мембранами других форм. Изменение емкости в ЧЭ при воздействии на него давления 10 кПа составило 0,02 пФ для мембраны круглой формы; 0,20 пФ для мембраны квадратной формы; 0,018 пФ для мембраны прямоугольной формы.

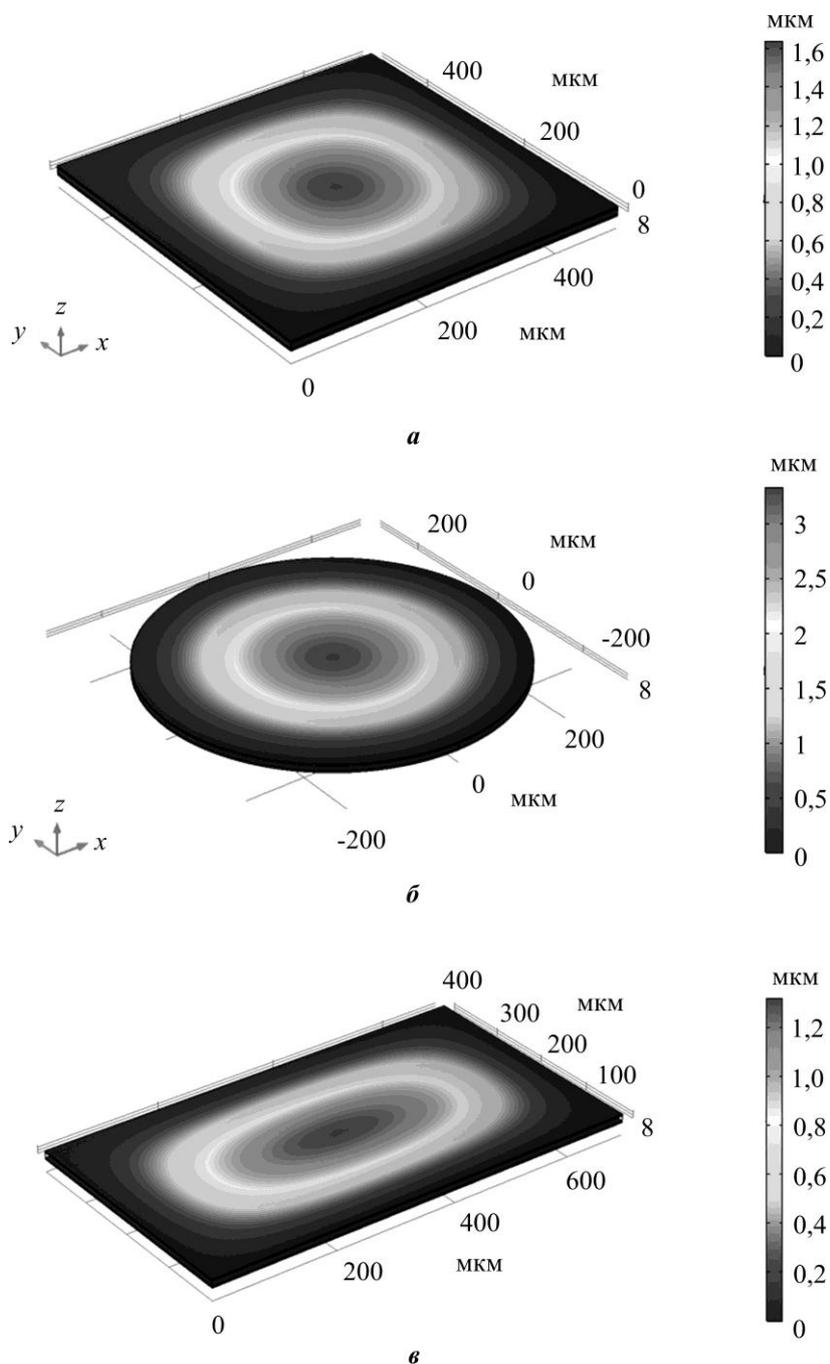


Рис. 3. Результаты расчета деформаций по площадям мембран квадратной (*a*), круглой (*б*) и прямоугольной (*в*) форм при воздействии на них давления 10 кПа

Fig. 3. The results of calculation of deformations by the areas of the membranes of the investigated forms under the influence of a pressure of 10 kPa on them: with a square form (*a*), with a round shape (*b*), with a rectangular shape (*c*) membranes

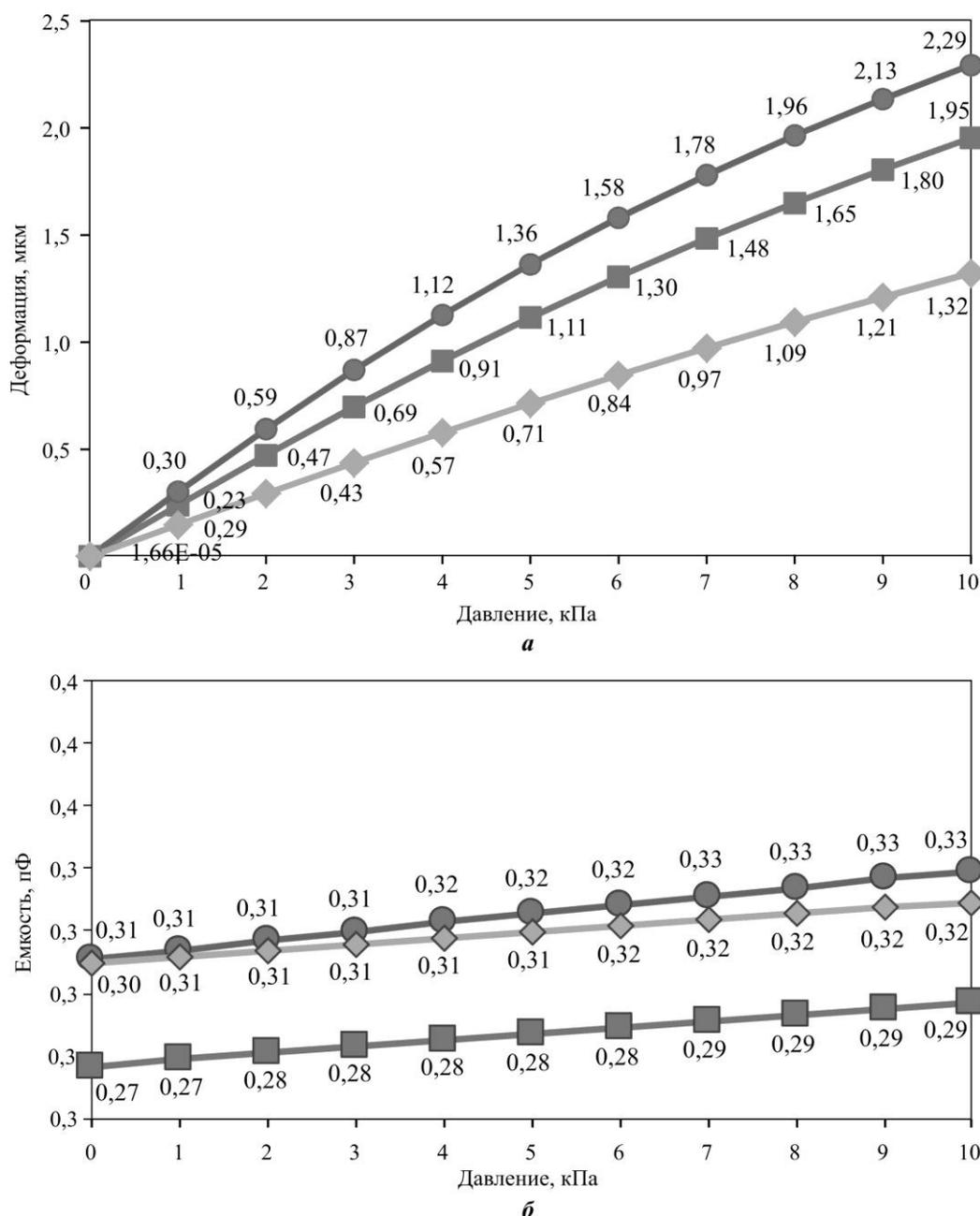


Рис. 4. Зависимости максимальной деформации мембран (а) и емкости между подвижным и неподвижным электродами (б) ЧЭ МЭМС-датчика давления емкостного типа с мембранами различных форм от воздействующего давления: —●— круглая; —■— квадратная; —◆— прямоугольная
 Fig. 4. Dependences of the maximum deformations of membranes (a) and capacitances between the movable diaphragm and the fixed electrode (b) of the sensitive element of capacitive-type MEMS pressure sensors with membranes of various shapes on the acting pressure: —●— round; —■— square; —◆— rectangular

Выбор материала мембраны. Существует ряд требований к материалам, используемым в конструкциях емкостных МЭМС-датчиков давления. К их числу относятся совместимость с технологией производства полупроводниковых кристаллов и приборов; соответствие высоким механическим и электрическим свойствам, предъявляемым к подобным изделиям; возможность обеспечения минимизации внутренних остаточных механических напряжений с помощью конструкторско-технологических методов. При проектировании полупроводниковых устройств, изделий электронной и микросистем-

ной техники используют различные конструкционные материалы: металлы (алюминий, серебро, золото, титан, медь), полупроводники (монокристаллический кремний, поликристаллический кремний, германий, арсенид галлия), неорганические изоляторы (диоксид кремния, карбид кремния, нитрид кремния, оксид алюминия) и полимеры (нейлон, полиэтилен) [8; 9, с. 237 – 256]. В рамках настоящей работы исследованы свойства восьми материалов. Расчеты выполнены для мембраны круглой формы, использование которой обеспечивает наиболее высокие деформации и изменения емкости в ЧЭ МЭМС-датчика давления. Для каждого материала мембраны рассчитана максимальная деформация (прогиб в центре диафрагмы), емкость между электродами ЧЭ при воздействии на ЧЭ давления 10 кПа. При отсутствии деформации мембраны емкость составила 0,312 пФ. Расчеты выполнены с помощью программы COMSOL. Результаты представлены в таблице.

Результаты расчетов максимальной деформации и емкости мембран из различных материалов при воздействии на ЧЭ давления 10 кПа

Results of calculations of maximum deformations of membranes made of various materials and changes in the capacitance of the SE under pressure up to 10 kPa

Материал	Модуль упругости (модуль Юнга), ГПа	Коэффициент Пуассона	Максимальный прогиб центра мембраны, мкм	Максимальная емкость, пФ
Монокристаллический кремний	170	0,28	2,29	0,35
Поликристаллический кремний	160	0,22	2,43	0,35
Германий	103	0,26	3,14	0,37
Арсенид галлия	85,9	0,31	3,38	0,37
Медь	120	0,34	2,77	0,36
Золото	70	0,44	3,51	0,38
Алюминий	70	0,35	3,69	0,38
Платина	168	0,38	2,14	0,34

Из данных таблицы следует, что мембрана из алюминия характеризуется максимальным отклонением диафрагмы и изменением емкости в ЧЭ, что обеспечивает наиболее высокую чувствительность МЭМС-датчика давления емкостного типа. Высокая чувствительность также обеспечивается при использовании мембраны из золота. Однако с технической точки зрения применение мембран из разных материалов требует конструкторско-технологических исследований, в частности необходимо сравнить прогиб и емкость ЧЭ для различных граничных условий крепления диафрагм. Следует оценить и собственную частоту колебаний.

Заключение. Исследования показали, что использование в ЧЭ МЭМС-датчика давления емкостного типа мембраны круглой формы обеспечивает максимальную деформацию мембраны и наибольшее изменение под действием давления по сравнению с изменениями этих параметров мембран других геометрических форм. Изучение свойств материалов, применяемых в конструкциях МЭМС-датчиков давления емкостного типа, позволило установить, что максимальные деформации мембраны и изменения емкости в ЧЭ достигаются при использовании мембран из алюминия и золота.

Литература

1. Design and optimization of structural elements of a piezoresistive pressure sensor / **Ye Ko Ko Aung, V. V. Kalugin, B. M. Simonov et al.** // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2020. P. 2225–2228. <https://doi.org/10.1109/EIconRus49466.2020.9039418>
2. **Chitra L., Ramakrishnan V.** A novel design of capacitive MEMS pressure sensor for lubricating system // 2014 IEEE National Conference on Emerging Trends in New and Renewable Energy Sources and Energy Management (NCET NRES EM). Chennai: IEEE, 2014. P. 204–208. <https://doi.org/10.1109/NCETNRESEM.2014.7088768>
3. **Roy P. S., Chakraborty D., Chattopadhyay M.** A study of silicon based MEMS capacitive sensor for absolute pressure measurement of a specific range // International Journal of Computer Application. 2014. Spec. iss. International Conference on Microelectronics, Circuits and Systems (MICRO-2014). P. 12–16.
4. Датчик давления ОВЕН // ИнСАТ [Электронный ресурс]. URL: <https://insat.ru/products/?category=1238&yclid=5238599808807657724> (дата обращения: 30.01.2023).
5. **Kubba A. E., Hasson A., Kubba A. I., Hall G.** A micro-capacitive pressure sensor design and modeling // J. Sens. Sens. Syst. 2016. Vol. 5. Iss. 1. P. 95–112. <https://doi.org/10.5194/jsss-5-95-2016>
6. **Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С.** Пластины и оболочки / пер. с англ. В. И. Контовта. 2-е изд., стер. М.: Наука, 1966. 636 с.
7. **Balavalad K. B., Sheeparamatti B. G.** A critical review of MEMS capacitive pressure sensors // Sensors and Transducers. 2015. Vol. 187. Iss. 4. P. 120–128.
8. Оценка работоспособности чувствительного элемента преобразователя линейных ускорений и расчет основных параметров / **В. В. Калугин, С. А. Анчутин, Е. С. Кочурина и др.** // Приборы. 2018. № 9 (219). С. 1–5.
9. **Hsu T.-R.** MEMS and microsystems: Design, manufacture, and nanoscale engineering. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008. 576 p.

Статья поступила в редакцию 16.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 07.11.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Пью Вин Тун – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kophyowinhun0@gmail.com

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), serborsel@mail.ru

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), spt111@mail.ru

References

1. Ye Ko Ko Aung, Kalugin V. V., Simonov B. M., Paing Soe Thu, Nyan Linn Phyo. Design and optimization of structural elements of a piezoresistive pressure sensor. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2020, pp. 2225–2228. <https://doi.org/10.1109/EIconRus49466.2020.9039418>
2. Chitra L., Ramakrishnan V. A novel design of capacitive MEMS pressure sensor for lubricating system. *2014 IEEE National Conference on Emerging Trends in New and Renewable Energy Sources and Energy Management (NCET NRES EM)*. Chennai, IEEE, 2014, pp. 204–208. <https://doi.org/10.1109/NCETNRESEM.2014.7088768>

3. Roy P. S., Chakraborty D., Chattopadhyay M. A study of silicon based MEMS capacitive sensor for absolute pressure measurement of a specific range. *International Journal of Computer Application*, 2014, spec. iss. International Conference on Microelectronics, Circuits and Systems (MICRO-2014), pp. 12–16.
4. Pressure sensor OVEN. *InSAT*. (In Russian). Available at: <https://insat.ru/products/?category=1238&yclid=5238599808807657724> (accessed: 30.01.2023).
5. Kubba A. E., Hasson A., Kubba A. I., Hall G. A micro-capacitive pressure sensor design and modeling. *J. Sens. Sens. Syst.*, 2016, vol. 5, iss. 1, pp. 95–112. <https://doi.org/10.5194/jsss-5-95-2016>
6. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. *Theory of plates and shells*. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1959. 580 p.
7. Balavalad K. B., Sheeparamatti B. G. A critical review of MEMS capacitive pressure sensors. *Sensors and Transducers*, 2015, vol. 187, iss. 4, pp. 120–128.
8. Kalugin V. V., Anchutin S. A., Kochurina E. S., Golovinsky M. S., Shalimov A. S. Evaluation of the performance of the sensor element of the linear acceleration converter and calculation of the main parameters. *Pribory = Instruments*, 2018, no. 9 (219), pp. 1–5. (In Russian).
9. Hsu T.-R. *MEMS and microsystems: Design, manufacture, and nanoscale engineering*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008. 576 p.

The article was submitted 16.05.2022; approved after reviewing 07.11.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Phyo Win Tun – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kophyowinhtun0@gmail.com

Boris M. Simonov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), serborsel@mail.ru

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt111@mail.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

Методики определения концентрации и подвижности в слоях областей пространственного заряда

В. П. Карамышев

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

Volodya-Arz@yandex.ru

Аннотация. Для исследования и контроля технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов измеряются вольт-фарадные и вольт-сименсные характеристики областей пространственного заряда в тонких слоях полупроводника. Непосредственное определение профилей распределения концентрации и подвижности носителей заряда по измеренным вольт-фарадным и вольт-сименсным характеристикам является актуальной задачей. В работе предложены простые оперативные методики обработки вольт-фарадных и вольт-сименсных характеристик в областях пространственного заряда в тонких слоях полупроводника с целью получения профилей распределения концентрации и подвижности носителей заряда. В частности, рассмотрено определение профилей концентрации основных носителей полупроводника, подвижности основных носителей полупроводника на структурах с проводящей подложкой, подвижности основных носителей полупроводника на структурах с изолирующей подложкой. Показано, что методики обработки вольт-фарадных и вольт-сименсных характеристик полупроводниковых структур типа диода Шоттки, несимметричного $p-n$ -перехода и МДП-структур могут использоваться для контроля технологических процессов и при разбраковке готовых приборов.

Ключевые слова: вольт-фарадные характеристики, вольт-сименсные характеристики, профиль распределения концентрации и подвижности, тонкие слои полупроводника

Для цитирования: Карамышев В. П. Методики определения концентрации и подвижности в слоях областей пространственного заряда // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 232–243. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-232-243>

Original article

Methods for determining the concentration and mobility in the layers of the space charge regions

V. P. Karamyshev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Volodya-Arz@yandex.ru

Abstract. The capacitance-voltage (C-V) and volt-siemens (G-V) characteristics in space charge regions (SCR) in thin semiconductor layers are measured for process monitoring and study in semiconductor devices manufacturing. Direct determination of concentration profiles and carrier mobility by measured C-V and G-V characteristics is a critical task. In this work, simple operational methods for processing C-V and G-V characteristics in SCR in thin semiconductor layers, aiming at obtaining concentration and mobility distribution profiles of charge carriers, are proposed. In particular, the determination of the concentration profile of the majority carriers of the semiconductor, the determination of the mobility profile of the main semiconductor carriers on structures with a conductive substrate, and the determination of the mobility profile of the main semiconductor carriers on structures with an insulating substrate, are considered. It has been demonstrated that the methods for processing C-V and G-V characteristics of semiconductor structures such as a Schottky diode, asymmetric p-n junction and MIS structures can be used for technological processes monitoring and when sorting finished devices.

Keywords: capacitance-voltage characteristics, volt-siemens characteristics, concentration and mobility distribution profile, thin semiconductor layer

For citation: Karamyshev V. P. Methods for determining the concentration and mobility in the layers of the space charge regions. Proc. Univ. Electronics, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 232–243. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-232-243>

Введение. Измерение вольт-фарадных (C-V) и вольт-сименсных (G-V) характеристик областей пространственного заряда (ОПЗ) в тонких слоях полупроводника используется для исследования и контроля технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов. Ведущие фирмы контрольно-измерительного оборудования выпускают измерительные установки с целью контроля указанных характеристик [1–6]. Как правило, при определении C-V- и G-V-характеристик задается распределение носителей и решается уравнение для электрического поля. Далее полученные C-V- и G-V-характеристики сравниваются с экспериментальными [7–11].

В настоящей работе проводится непосредственное определение по измеренным C-V- и G-V-характеристикам профилей распределения концентрации и подвижности носителей заряда [12–14].

Профиль концентрации основных носителей в ОПЗ. Пусть приповерхностная область полупроводника находится в режиме обеднения основными носителями тока. Постоянное поле, приложенное к поверхности полупроводника, экранируется только ионизированными атомами примеси (для определенности – донорной). Пространственный заряд имеется только внутри области от поверхности до x_d . На расстояниях, пре-

вышающих x_d , объем полупроводника квазинейтрален. Вкладом поверхностных состояний пренебрегаем. На рис. 1 приведен поперечный разрез полупроводниковой структуры.

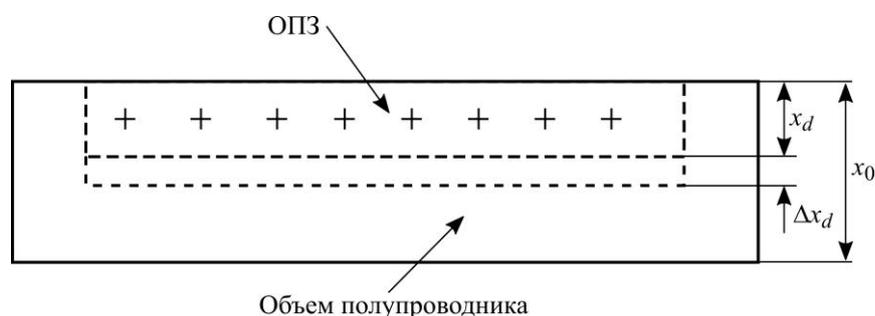


Рис. 1. Поперечный разрез полупроводниковой структуры
Fig. 1. Cross section of semiconductor structure

В рассматриваемом случае второй интеграл уравнения Пуассона может быть записан в виде

$$y_s = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0\phi_T} \int_{x=x_d}^{x'} dx \int_{x'=x_d}^x N(x'), \quad (1)$$

где y_s – поверхностный потенциал, выраженный в единицах теплового потенциала; q – элементарный заряд; ε – относительная диэлектрическая постоянная полупроводника; ε_0 – абсолютная диэлектрическая постоянная вакуума; $\phi_T = kT/q$, $V = \phi_T y_s$; V – напряжение смещения; $N(x)$ – распределение донорной примеси.

При увеличении обедняющего поверхностного потенциала по абсолютной величине от y_s до $y_s + \Delta y_s$ область обеднения расширяется на величину Δx_d и из выражения (1) следует:

$$\Delta y_s = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0\phi_T} \left[-N(x_d + \theta_1 \Delta x_d) x_d \Delta x_d - N(x_d + \theta_2 \Delta x_d) \frac{\Delta^2 x_d}{2} - N(x_d + \theta_3 \Delta x_d) \Delta^2 x_d \right],$$

где $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – некоторые числа из интервала от 0 до 1.

Переходя к пределу при $\Delta y_s \rightarrow 0$ и отбрасывая в предыдущем выражении члены, содержащие Δx_d^2 , получаем

$$-\frac{dy_s}{dx_d} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0\phi_T} N(x_d) x_d. \quad (2)$$

Пространственный заряд (space charge) слоя обеднения равен:

$$Q_{s.c} = q \int_{x=0}^{x_d} N(x) dx.$$

При расширении слоя ОПЗ на Δx_d заряд слоя обеднения возрастает на величину

$$\Delta Q_{s.c} = qN(x_d + \theta_4 \Delta x_d) \Delta x_d,$$

где $0 \leq \theta_4 \leq 1$.

Тогда при $\Delta x_d \rightarrow 0$

$$\frac{dQ_{s.c.}}{dx_d} = qN(x_d). \quad (3)$$

Дифференциальная емкость слоя обеднения, равная

$$C_{s.c.} = -\frac{1}{\varphi_T} \frac{dQ_{s.c.}}{dx_d},$$

может быть получена из выражений (2) и (3) в виде

$$C_{s.c.} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{x_d}. \quad (4)$$

Исключая из формулы (2) глубину обеднения x_d с помощью (4), получаем выражение для концентрации:

$$n(x_d) \equiv N(x_d) = -\frac{2\varphi_T}{q\varepsilon\varepsilon_0} \left[\frac{d(C_{s.c.})^{-2}}{dy_s} \right]^{-1} = -\frac{2}{q\varepsilon\varepsilon_0 S^2} \left[\frac{d(C)^{-2}}{dV} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где n – концентрация основных носителей, тождественно равная концентрации легирующей примеси на границе ОПЗ с квазинейтральным объемом в точке x_d :

$$x_d = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{C_{s.c.}(V)} S. \quad (6)$$

Здесь $C_{s.c.} = C(V)/S$ – емкость на единицу площади электрода; S – площадь электрода.

Выражение (6) определяет положение границы ОПЗ x_d .

Более точные вычисления с учетом наличия в ОПЗ основных носителей дают следующие выражения для емкости и концентрации основных носителей [1]:

$$C_{s.c.} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{x_d} \frac{1 - e^{y_s}}{[e^{y_s} - y_s - 1]^{1/2}}, \quad (7)$$

$$n(x_d)_{o.n.} = -\frac{2\varphi_T}{q\varepsilon\varepsilon_0} \left[\frac{d(C_{s.c.})^{-2}}{dy_s} \right]^{-1} = n_0 \frac{(1 - e^{y_s})^3}{1 + 2y_s e^{y_s} - e^{2y_s}}. \quad (8)$$

Отличия выражений (7) и (8) от выражений (4) и (5) заметны только для малых значений поверхностного потенциала y_s порядка (1–2). Наибольшее различие в концентрации $n_{o.n.}$ достигается при $y_s = 0$ и составляет 300 % $n_{o.n.} = 3n_0$, где n_0 вычисляется согласно выражению (5).

Профиль подвижности основных носителей для полупроводниковых структур с проводящей подложкой. На рис. 2 приведена условная эквивалентная схема полупроводниковой структуры с барьером Шоттки на проводящей подложке. Емкость ОПЗ C и сопротивление подложки R соединены последовательно. Рассмотрим элемент сопротивления объема подложки R :

$$R = \frac{1}{S} \int_{y=0}^{y=h} \rho dy,$$

где h – толщина слоя подложки; ρ – удельное сопротивление в объеме подложки.

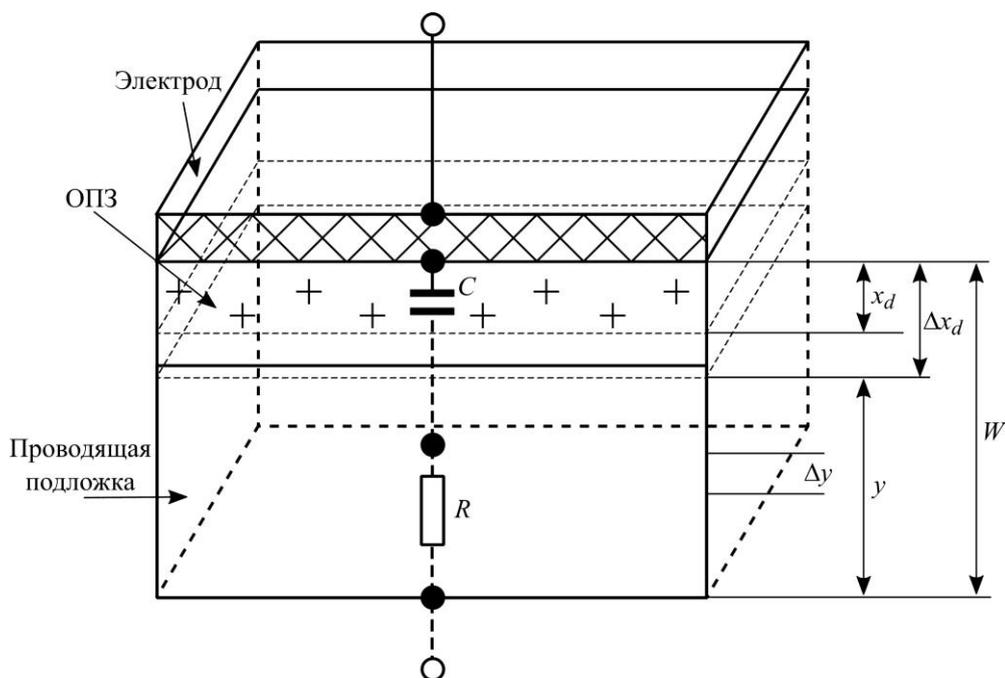


Рис. 2. Поперечный разрез полупроводниковой структуры с проводящей подложкой
 Fig. 2. Cross section of semiconductor structure with a conductive substrate

При изменении h на дифференциально малую величину Δh меняется сопротивление R :

$$R + dR = \frac{1}{S} \int_{y=0}^{y=h+\Delta h} \rho dy.$$

Последнее выражение можно представить в виде

$$R + dR = \frac{1}{S} \int_{y=0}^{y=h} \rho dy + \frac{1}{S} \int_{y=h}^{y=h+\Delta h} \rho dy$$

или для малых приращений Δh :

$$R + dR = R + \frac{\Delta h}{S q \mu(h + \theta \Delta h) n(h + \theta \Delta h)},$$

где μ – подвижность основных носителей; $0 \leq \theta \leq 1$ – некоторое число.

Перейдем к пределу для малых дифференциалов Δh :

$$\frac{dR}{dh} = \frac{1}{S q \mu(h) n(h)}.$$

Из последнего уравнения следует выражение для подвижности:

$$\mu(h) = \frac{1}{S q n(h) \left| \frac{dR}{dh} \right|}, \quad (9)$$

здесь h (или x_d) определяется с помощью выражения (6).

Заменим в формуле (9) с помощью (6) производную по глубине h (или x_d) на производную по напряжению смещения V :

$$dx_d = \varepsilon \varepsilon_0 S \frac{dC^{-1}}{dV} dV. \quad (10)$$

Выражение для подвижности, эквивалентное (9), имеет вид

$$\mu = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{qn} \left| \frac{dC^{-1}}{dV} \right| \left| \left[\frac{dR}{dV} \right]^{-1} \right|.$$

Профиль подвижности основных носителей для полупроводниковых структур с изолирующей подложкой. Рассмотрим распределенную схему планарного диода Шоттки на изолирующей подложке. Измерения проводятся в последовательной эквивалентной схеме замещения. Переменный измерительный сигнал U втекает со стороны верхнего полевого электрода, растекается по дифференциально малым участкам емкостей верхнего электрода dC и втекает в проводящую область полупроводника. Переменный измерительный сигнал растекается по дифференциально малым участкам слоя с сопротивлением dR .

Все дифференциально малые токи ΔI собираются шиной тока I и в результате вытекают из полупроводниковой структуры. Структура находится под обедняющим постоянным напряжением V , приложенным к металлическому электроду, к которому приложено переменное напряжение измерительного малого сигнала U . Обратное сопротивление необедненной части слоя полупроводника равно:

$$\rho^{*-1} = q \int_w^m \mu n dy. \quad (11)$$

Дифференциально малая часть емкости ОПЗ под электродом равна:

$$dC = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{l dx}{m},$$

где l – глубина электрода; m – толщина ОПЗ.

Дифференциально малое сопротивление проводящей части слоя равно:

$$dR = \rho^* \frac{dx}{l}.$$

Изменения тока и напряжения переменного сигнала можно записать в виде

$$dI = \varphi_T (U_0 - U) j \omega dC, \quad (12)$$

$$\varphi_T dU = -I(x) \frac{\rho^*}{l} dx, \quad (13)$$

где U_0 – переменный потенциал верхнего измерительного электрода; j – мнимая единица; ω – круговая частота переменного измерительного сигнала.

Из уравнений (12) и (13) получаем выражения для производных:

$$\frac{dI}{dx} = j \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \omega l}{m} \varphi_T [U_0 - U(x)], \quad (14)$$

$$\varphi_T \frac{dU}{dx} = - \frac{\rho^*}{l} I(x). \quad (15)$$

Введем характеристическую длину втекания переменного сигнала η :

$$\eta^2 = \frac{m}{\varepsilon \varepsilon_0 \omega l \rho^*}, \quad \frac{1}{\eta^2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \omega l \rho^*}{m}. \quad (16)$$

Для получения уравнений, содержащих только по одной переменной – либо I , либо U , выполним следующие преобразования. Дифференцируем уравнения (14) и (15) по координате x . Перейдем от x к безразмерной координате $\chi = x/\eta$. В результате получим два дифференциальных уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 I}{d\chi^2} - j I(\chi) = 0, \quad (17)$$

$$\frac{d^2 U}{d\chi^2} - j [U(\chi) - U_0] = 0.$$

Решение для тока имеет вид

$$I(\chi) = C_1 e^{\alpha\chi} + C_2 e^{-\alpha\chi}. \quad (18)$$

Вычисляя из формулы (18) первую и вторую производные и подставляя их в (17), получаем для α :

$$\alpha^2 I(\chi) - j I(\chi) = 0.$$

Отсюда следуют выражения $\alpha^2 = j$, или $\alpha = \sqrt{j}$.

Ток I в начале координат равен нулю. Тогда $C_2 = -C_1$. Выражение для тока (17) приобретает вид

$$I(\chi) = C_1 (e^{\alpha\chi} - e^{-\alpha\chi}). \quad (19)$$

Используем формулу (19) и следующее из него выражение для производной и подставим его в (14). В результате имеем

$$\varphi_T [U_0 - U(x)] = \frac{\rho^*}{jl} \eta \sqrt{j} C_1 (e^{\chi\sqrt{j}} + e^{-\chi\sqrt{j}}). \quad (20)$$

Для мнимой единицы имеют место соотношения

$$\frac{\sqrt{j}}{j} = \frac{j\sqrt{j}}{j^2} = -j\sqrt{j} = -\frac{j-1}{\sqrt{2}} = \frac{1-j}{\sqrt{2}}. \quad (21)$$

Подставим (21) в формулу (20) и получим выражение для напряжения в точке X_A :

$$\varphi_T [U_0 - U(A)] = \frac{\rho^* \eta}{l} \frac{1-j}{\sqrt{2}} C_1 (e^{A\sqrt{j}} + e^{-A\sqrt{j}}), \quad (22)$$

где $A = X_A/\eta$.

Формулы (19) для тока и (22) для напряжения позволяют записать выражение для полного комплексного сопротивления в точке X_A :

$$Z(A) = \frac{\Phi_T [U_0 - U(A)]}{I(A)}$$

или

$$Z(A) = \frac{\rho^* \eta}{l \sqrt{2}} (1 - j) D(A), \quad (23)$$

здесь $D(A) = \frac{(e^{A\sqrt{j}} + e^{-A\sqrt{j}})}{(e^{A\sqrt{j}} - e^{-A\sqrt{j}})}$.

Вместо координаты A введем безразмерную координату B : $B = A/\sqrt{2}$. Используем для корня из мнимой единицы $\sqrt{j} = (1 + j)/\sqrt{2}$. Запишем выражение для дроби D , входящей в формулу (23):

$$D(B) = \frac{e^{jB} e^B + e^{-jB} e^{-B}}{e^{jB} e^B - e^{-jB} e^{-B}}. \quad (24)$$

Выполним следующие преобразования выражения (24). Для экспонент от комплексного показателя воспользуемся формулами Эйлера, далее избавимся от комплексных слагаемых в знаменателе и применим формулы для двойного угла. В результате выражение (24) принимает вид

$$D(B) = \frac{\text{sh}(2B) - j \sin(2B)}{\text{ch}(2B) - j \cos(2B)}.$$

Выражение для комплексного сопротивления Z (23) после деления на действительную и мнимую части принимает вид

$$Z(A) = \frac{\rho^* \eta}{l \sqrt{2}} \frac{\text{sh}(2B) - \sin(2B)}{\text{ch}(2B) - \cos(2B)} + \frac{1}{j} \left(\frac{l \sqrt{2}}{\rho^* \eta} \right)^{-1} \left(\frac{\text{ch}(2B) - \cos(2B)}{\text{sh}(2B) + \sin(2B)} \right)^{-1}. \quad (25)$$

Из формулы (25) следуют выражения для эквивалентных последовательных сопротивления и емкости всей структуры:

$$R(A) = \frac{\rho^* \eta}{l \sqrt{2}} \frac{\text{sh}(2B) - \sin(2B)}{\text{ch}(2B) - \cos(2B)}, \quad (26)$$

$$C(A) = \frac{l \sqrt{2}}{\omega \rho^* \eta} \frac{\text{ch}(2B) - \cos(2B)}{\text{sh}(2B) + \sin(2B)}. \quad (27)$$

Рассмотрим два предельных случая: малые длины X_A и большие длины X_A по отношению к характеристической длине втекания переменного тока η .

При малых длинах электрода $X_A \ll \eta$. Воспользуемся разложениями в ряды для экспонент, гиперболических и обычных синусов и косинусов. Вместо формул (26) и (27) получаем

$$R(X_A) = \frac{1}{3} \rho^* \frac{X_A}{l}, \quad (28)$$

$$C_A = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{l X_A}{m}. \quad (29)$$

В выражении (28) отношение X_A/l соответствует количеству квадратов площади электрода структуры, а в выражении (29) lX_A/m – площадь электрода, деленная на глубину ОПЗ.

Определим профиль подвижности основных носителей для полупроводниковых структур с изолирующей подложкой. При смещении границы обеднения m (рис. 3) удельное сопротивление слоя подложки ρ^* меняется. Для изменения $\Delta\rho^{*-1}$ из формулы (11) следует

$$\Delta\rho^{*-1} = q \int_w^{m+\Delta m} \mu ndy - q \int_w^m \mu ndy. \quad (30)$$

Выражение (30) может быть представлено в виде

$$\Delta\rho^{*-1} = q \int_m^{m+\Delta m} \mu ndy = q\mu(m + \theta\Delta m) n(m + \theta\Delta m)\Delta m.$$

Перейдем к пределу $\Delta m \rightarrow 0$ и получим выражение для производной:

$$\frac{d\rho^{*-1}}{dm} = q\mu(m)n(m). \quad (31)$$

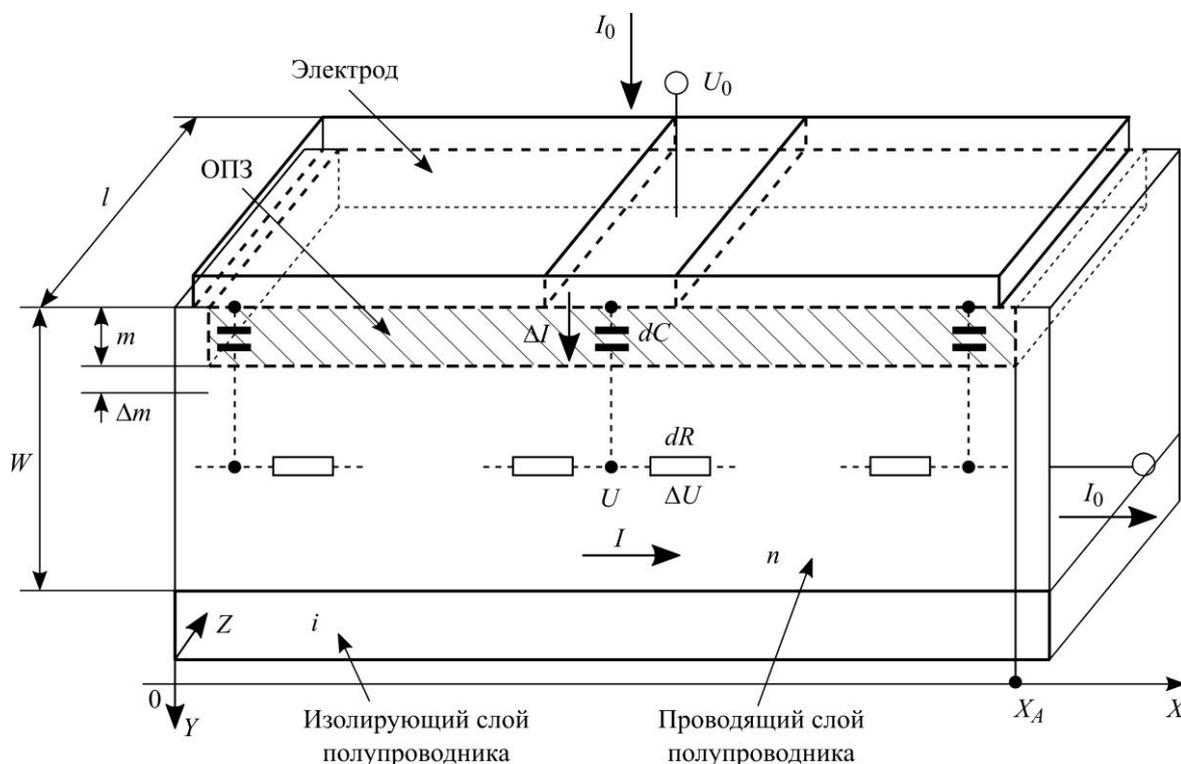


Рис. 3. Поперечный разрез полупроводниковой структуры с изолирующей подложкой
 Fig. 3. Cross section of a semiconductor structure with an insulating substrate

Выразим обратное слоевое сопротивление из выражения для сопротивления структуры (28) и продифференцируем его по глубине m :

$$\frac{d\rho^{*-1}}{dm} = \frac{1}{3} \frac{X_A}{l} \frac{d(R(X_A))^{-1}}{dm}. \quad (32)$$

Из формул (31) и (32) получаем выражение для подвижности при малых длинах электрода X_A :

$$\mu(m) = \frac{1}{3} \frac{X_A}{l} \frac{1}{qn(m)} \left| \frac{d(R(X_A))^{-1}}{dm} \right|. \quad (33)$$

Используя формулу (10), заменим в (33) производную по глубине m на производную по напряжению смещения V . Получаем эквивалентный вид выражения для подвижности:

$$\mu = \frac{1}{3l^2 qn \epsilon \epsilon_0} \left| \frac{d(R^{-1})}{dV} \right| \left| \left[\frac{dC^{-1}}{dV} \right]^{-1} \right|. \quad (34)$$

При больших длинах электрода $X_A \gg \eta$. В этом случае гиперболические синусы и косинусы превосходят по модулю обычные синусы и косинусы. Выражение для дроби (24) приобретает вид

$$\frac{\text{sh}(2B) - \sin(2B)}{\text{ch}(2B) - \cos(2B)} \approx \frac{e^{2B}}{e^{2B}} = 1.$$

Вместо выражений (26) и (27) можно записать

$$R(X_A) = \frac{\rho^* \eta}{l\sqrt{2}}, \quad (35)$$

$$C(X_A) = \epsilon \epsilon_0 \frac{\eta l \sqrt{2}}{m}. \quad (36)$$

Выражения (35) и (36) показывают, что при больших длинах электрода вклад в емкость и сопротивление дают только области под электродом протяженностью η .

Заключение. В результате проведенной работы получены выражения для профиля концентрации основных носителей полупроводника (5); профиля подвижности основных носителей полупроводника на структурах с проводящей подложкой (9); профиля подвижности основных носителей полупроводника на структурах с изолирующей подложкой (33), (34).

Полученные выражения можно использовать при обработке экспериментальных C - V - и G - V -характеристик.

Литература

1. Анализаторы параметров полупроводниковых приборов: Измерение IV-CV с использованием модулей MFCMU и SCUU анализатора B1500A // Америк [Электронный ресурс]. 08.06.2021. URL: http://www.amerit.nnov.ru/uploads/lib/Keysight_catalog_2021.pdf (дата обращения: 01.02.2023).
2. Keysight B1500A: Анализатор полупроводниковых приборов // Америк [Электронный ресурс]. 03.08.2014. URL: http://www.amerit.nnov.ru/uploads/lib/K5991-2443RURU_Анализатор%20полупроводниковых%20приборов.pdf (дата обращения: 01.02.2023).

3. Keysight: Измерители RLC E4980A, E4980AL, E4990A // КТМ [Электронный ресурс]. URL: <https://kiptm.ru/produktsiya/keysight-produktsiya/keysight-izmeriteli-rlc> (дата обращения: 01.02.2023).
4. Параметрический анализатор Keithley 4200A-SCS // Tektronix [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tek.com/ru/products/keithley/4200a-scs-parameter-analyzer> (дата обращения: 26.11.2022).
5. LCR-78110G – измеритель параметров RLC цифровой // Электронприбор [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electronpribor.ru/catalog/53/lcr-78110g.htm> (дата обращения: 26.11.2022).
6. Измеритель иммитанса E7-20 // МНИПИ [Электронный ресурс]. URL: <http://mnipi.com/catalog/izmeriteli-immitansa-rlc/izmeritel-immitansa-e7-20.html> (дата обращения: 03.02.2023).
7. Бахвалова С. А., Спиридонов А. Б., Фастовец А. А., Сергеев В. В. Моделирование МДП-варикапа с переносом заряда в программной среде ADS // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 2. С. 183–188. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-2-183-188>
8. Мельник Н. Н., Трегулов В. В., Рыбин Н. Б., Иванов А. И. Особенности строения приповерхностной области полупроводниковой структуры, сформированной металл-стимулированным травлением монокристаллического кремния // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. № 10. С. 39–45.
9. Влияние дефектов с глубокими уровнями на С-V-характеристики мощных AlGaIn/GaN/SiC НЕМТ // К. Л. Енишерлова, Ю. В. Колковский, Е. А. Боброва и др. // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 1. С. 47–55. <https://doi.org/10.1134/S0544126919010046>
10. Литвинов В. Г., Литвинова В. С. Исследование вольт-фарадной характеристики точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник РГРТУ. 2020. № 73. С. 129–138. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-73-129-138>
11. Гончаров В. Е., Никонов А. В., Ильясов А. К., Арич О. Д. Определение толщины эпитаксиальных слоев гетеропары AlGaAs/GaAs методом электрохимического вольт-фарадного профилирования // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 61–66.
12. Мурылева И. В., Пашищев Ю. И., Карамышев В. П. Определение профиля концентрации основных носителей полупроводника в ОПЗ по вольт-фарадной характеристике // Микроэлектроника. 1980. Т. 9. Вып. 3. С. 236–240.
13. Карамышев В. П., Лаврищев В. П., Мурылева И. В., Панасенко П. В. Методика определения профилей распределения концентрации и подвижности носителей в проводящем слое полупроводника, расположенном на полуизолирующей подложке // Микроэлектроника. 1989. Т. 18. Вып. 1. С. 9–14.
14. Карамышев В. П. Научно-технический отчет по НИР «Разработка универсальной тестовой ячейки для межоперационного контроля изготовления СВЧ ИС». М.: НИИМП, 1989.

Статья поступила в редакцию 18.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.11.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторе

Карамышев Владимир Петрович – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер Научно-исследовательской лаборатории функциональной электроники на новых принципах Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Volodya-Arz@yandex.ru

References

1. Semiconductor device parameter analyzers: IV-CV measurement with MFCMU and SCUU modules of the B1500A analyzer. *Amerit*. 08.06.2021. (In Russian). Available at: http://www.amerit.nnov.ru/uploads/lib/Keysight_catalog_2021.pdf (accessed: 01.02.2023).
2. Keysight B1500A: Semiconductor device analyzer. *Amerit*. 03.08.2014. (In Russian). Available at: http://www.amerit.nnov.ru/uploads/lib/K5991-2443RURU_Анализатор%20полупроводниковых%20приборов.pdf (accessed: 01.02.2023).
3. Keysight: *RLC meters E4980A, E4980AL, E4990A. KTM*. (In Russian). Available at: <https://kiptm.ru/produktsiya/keysight-produktsiya/keysight-izmeriteli-rlc> (accessed: 01.02.2023).
4. Parametric analyzer Keithley 4200A-SCS. *Tektronix*. (In Russian). Available at: <https://www.tek.com/ru/products/keithley/4200a-scs-parameter-analyzer> (accessed: 26.11.2022).
5. LCR-78110G – digital RLC tester. *Elektronpribor*. (In Russian). Available at: <https://www.electronpribor.ru/catalog/53/lcr-78110g.htm> (accessed: 26.11.2022).

6. Immittance meter E7-20. *MNIPI*. (In Russian). Available at: <http://mnipi.com/catalog/izmeriteli-immitansa-rlc/izmeritel-immitansa-e7-20.html> (accessed: 03.02.2023).

7. Bahvalova S. A., Spiridonov A. B., Fastovets A. A., Seregin V. V. MIS varicap with charge transfer modeling in the ADS program environment. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, iss. 2, pp. 183–188. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-2-183-188>

8. Melnik N. N., Tregulov V. V., Rybin N. B., Ivanov A. I. Features of the surface region of the semiconductor structure formed by metal-assisted chemical etching of single-crystal silicon. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2019, vol. 46, iss. 10, pp. 324–327. <https://doi.org/10.3103/S1068335619100063>

9. Enisherlova K. L., Kolkovskii Yu. V., Bobrova E. A., Temper E. M., Kapilin S. A. The effect of defects with deep levels on the C–V characteristics of high-power AlGaIn/GaN/SiC HEMTs. *Russ. Microelectron.*, 2019, vol. 48, iss. 1, pp. 28–36. <https://doi.org/10.1134/S1063739719010049>

10. Litvinov V. G., Litvinova V. S. Studying the capacitance-voltage characteristics of metal-semiconductor point barrier contact. *Vestnik RGRU = Vestnik of RSREU*, 2020, no. 73, pp. 129–138. (In Russian). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-73-129-138>

11. Goncharov V. E., Nikonov A. V., Ilyasov A. K., Arich O. D. Estimation of AlGaAs/GaAs epitaxial structures thickness by means of electrochemical capacitance-voltage profiling. *Prikladnaya fizika*, 2019, no. 3, pp. 61–66. (In Russian).

12. Muryleva I. V., Pashintsev Yu. I., Karamyshev V. P. Determination of the concentration profile of the majority carriers of a semiconductor in the SCR using volt-farad characteristic. *Mikroelektronika = Microelectronics*, 1980, vol. 9, iss. 3, pp. 236–240. (In Russian).

13. Karamyshev V. P., Lavrishchev V. P., Muryleva I. V., Panasenko P. V. Procedures for determining the distribution profiles of the concentration and mobility of carriers in a conducting layer of a semiconductor located on a semi-insulating substrate. *Mikroelektronika = Microelectronics*, 1989, vol. 18, iss. 1, pp. 9–14. (In Russian).

14. Karamyshev V.P. (scientific director), Scientific and technical report on research “Development of a universal test cell for interoperational control manufacture of microwave IS”, NIIMP, Moscow, 1989

The article was submitted 18.11.2022; approved after reviewing 21.11.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the author

Vladimir P. Karamyshev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Engineer of the Research Laboratory of Functional Electronics Based on New Principles, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Volodya-Arz@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>

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Научная статья
УДК 004.832:004.7
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-2-244-251

Информационная система поддержки принятия решений по управлению режимами работы когнитивного радио

Е. В. Карачев, Г. А. Благодатский, С. В. Смирнов

*Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия*

evgeshkarach@gmail.com

Аннотация. Управление радиосистемами, работающими в коротковолновом и ультракоротковолновом диапазонах, требует от оператора знаний особенностей передачи радиосигналов в различных внешних условиях. Для облегчения работы оператора системы необходимо автоматизировать настройку радиосистем в соответствии с различными сценариями их применения в виде специального программного обеспечения систем поддержки принятия решений. В работе рассмотрена проблема принятия решений и управления сложной технической системой с помощью информационной системы, база знаний которой интегрирует опыт работы и проектирования когнитивного радио, функционирующих в коротковолновом и ультракоротковолновом диапазонах. Представлены результаты внедрения в систему элементов искусственного интеллекта и методов автоматического управления режимами работы системы когнитивного радио. Приведены алгоритм управления режимами работы системы когнитивного радио, схема классов информационной системы поддержки принятия решений и результат их совместного применения в виде программ управления режимами работы. Установлено, что при изменении мощности приемопередающей аппаратуры, скорости приема-передачи, типа сигнально-кодовых конструкций, несущей частоты и полосы система может работать эффективнее в одной или нескольких заданных ситуациях.

Ключевые слова: матрица решений, алгоритм управления, когнитивное радио, базы знаний, система поддержки принятия решений

Для цитирования: Карачев Е. В., Благодатский Г. А., Смирнов С. В. Информационная система поддержки принятия решений по управлению режимами работы когнитивного радио // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 244–251. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-244-251>

Original article

Decision support information system for cognitive radio operation mode management

E. V. Karachev, G. A. Blagodatsky, S. V. Smirnov

*Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov,
Izhevsk, Russia*

evgeshkarach@gmail.com

Abstract. The management of radio systems operating in the shortwave and ultra-shortwave bands requires from operator the awareness of radio transmission features under different environmental conditions. In a bid to facilitate the system operator work, it is necessary to automate radio system tuning according to various application scenarios in the form of mode control programs. In this work, the problem of decision-making and control of a complex technical system using an information system whose knowledge base integrates the experience and design of cognitive radio systems operating in the shortwave and ultra-shortwave bands is considered. The results of elements of artificial intelligence and methods of automatic mode control of the cognitive radio system incorporation into the system are presented. An algorithm for managing the modes of operation of the cognitive radio system, a scheme of classes of decision support information system and the result of their joint application in the form of mode control programs are given. It has been established that on change of transmit equipment capacity, transmit and receive speed, signal-code sequence type, carrier frequency and band, the system can work more efficiently in one or several predefined situations.

Keywords: decision matrix, control algorithm, cognitive radio, knowledge bases, decision support system

For citation: Karachev E. V., Blagodatsky G. A., Smirnov S. V. Decision support information system for cognitive radio operation mode management. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 244–251. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-244-251>

Введение. В современных условиях к техническим системам предъявляются такие требования, как снижение трудоемкости работы пользователя, повышение удобства использования, возможность работы пользователя без специальных технических знаний. Решить данные задачи можно путем введения в систему механизмов адаптации к окружающей среде и элементов искусственного интеллекта (баз знаний, матриц решений).

Передача радиосигналов в коротковолновом и ультракоротковолновом диапазонах представляет собой сложный процесс в связи с воздействующими внешними факторами: состоянием атмосферы, наличием преград на пути распространения сигнала и радиочастотных помех. Управление радиосистемами работающими в указанных диапазонах системами требует от оператора обширных знаний особенностей передачи радиосигналов в различных внешних условиях [1].

В настоящей работе для облегчения работы оператора системы и уменьшения количества случайных ошибок предлагается автоматизировать настройку радиосистем

в соответствии с различными сценариями их применения в виде специального программного обеспечения систем поддержки принятия решений. В состав подобных программных проектов необходимо внести модули контроля внутреннего состояния системы и окружающей среды. На основе данных, полученных с датчиков положения и относительного расположения внешних объектов, происходит автономная корректировка протоколов и параметров эксплуатации технической системы. При доступной мощности вычислительных средств в систему могут быть включены блоки самообучения [2].

Постановка задачи. В условиях конкретной ситуации помеховые действия добавляются к природно-географическим факторам и внутренним электромагнитным излучениям электронной схемы приема-передающих компонентов механизма. Модули радиосвязи должны функционировать с учетом искажений, географического положения и расстояний до внешних объектов. Задача поступающего набора данных – вносить поправки в набор действующих протоколов и параметров эксплуатации технического устройства. Для достижения заранее определенной цели в систему можно добавить блок самообучения.

Один из вариантов рассмотрения описываемой системы передачи радиосигналов – многоуровневая иерархическая структура [3]. Метод анализа иерархий, предложенный Т. Саати, дает возможность формализовать процесс принятия решений для достижения необходимого уровня эффективности системы когнитивной радиосвязи. На рис. 1 представлены уровни факторов, оказывающих влияние на достижение цели.

Пронумеруем уровни схемы от 0 до 4 сверху вниз. Определим степень зависимости цели системы от параметров четвертого уровня [4] и целевую функцию F для оптимизации достоверности передачи сигнала. Веса, полученные на основе экспертных оценок, обозначим через коэффициенты ω_{i_4} [5].

Максимизируем значение целевой функции:

$$F(\vec{c}, \vec{x}) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max.$$

При этом вектор $\vec{c} = \{c_j\} = \{w_{i_4 j}\}$, $j = \overline{1, n}$, вектор $\vec{x} = \{x_j\}$, $j = \overline{1, n}$. Компоненты вектора \vec{x} следующие (см. рис. 1): x_1 – мощность передающего устройства; x_2 – скорость потока данных; x_3 – регламентные правила; x_4 – тип сигнально-кодовой конструкции (СКК); x_5 – частотные характеристики; x_6 – алгоритм обработки сигналов (АОС).

Зададим для функции ограничения по ресурсам:

$$\vec{b} = \{b_i\}, i = \overline{1, m}.$$

В рассматриваемом случае коэффициентами b будут объем энергетических затрат на передачу; вычислительная нагрузка при формировании и расшифровке пакетов данных; времена приема-передачи [6]. Тогда матрица расхода ресурсов $A = \{a_{ij}\}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

Таким образом, задача будет представлена в следующем виде [7]:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 \leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 \leq b_2, \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 \leq b_3. \end{cases}$$

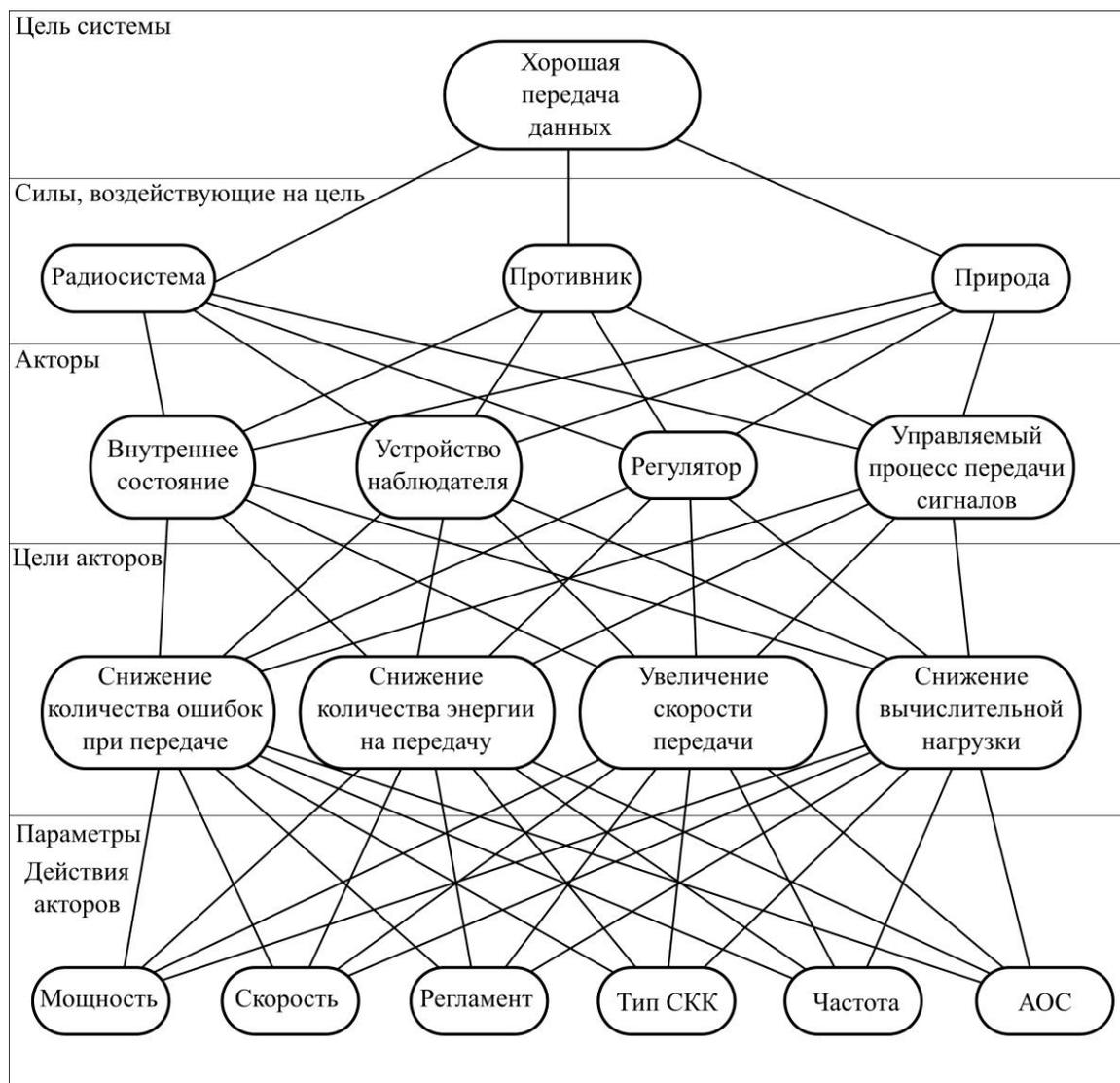


Рис. 1. Иерархическая система когнитивного радио

Fig. 1. Hierarchical system of cognitive radio

Определение переменных вектора $\vec{x} = \{x_j\}, j = \overline{1, n}$, задает наибольшие значения x_j как лучшие показатели. Нормирование переменных и ограничений к значениям от 0 до 1 дает возможность представить задачу в безразмерном виде:

$$\vec{x} = \{x_j \in [0, 1]\}, j = \overline{1, n},$$

$$\vec{b} = \{b_i \in [0, 1]\}, i = \overline{1, m}.$$

Результаты применения алгоритма управления к вариантам работы системы когнитивного радио. Результаты применения алгоритма управления к вариантам работы системы когнитивного радио в аналоговых и цифровых режимах передачи сигнала в четырех возможных ситуациях F_j следующие: 1) полные временные и энергетические ресурсы F_1 ; 2) половина заряда батарей, полные временные ресурсы F_2 ; 3) критический заряд батарей, полные временные ресурсы F_3 ; 4) недостаток времени, полные энергетические ресурсы F_4 . Для каждого фактора F_j существует лучший

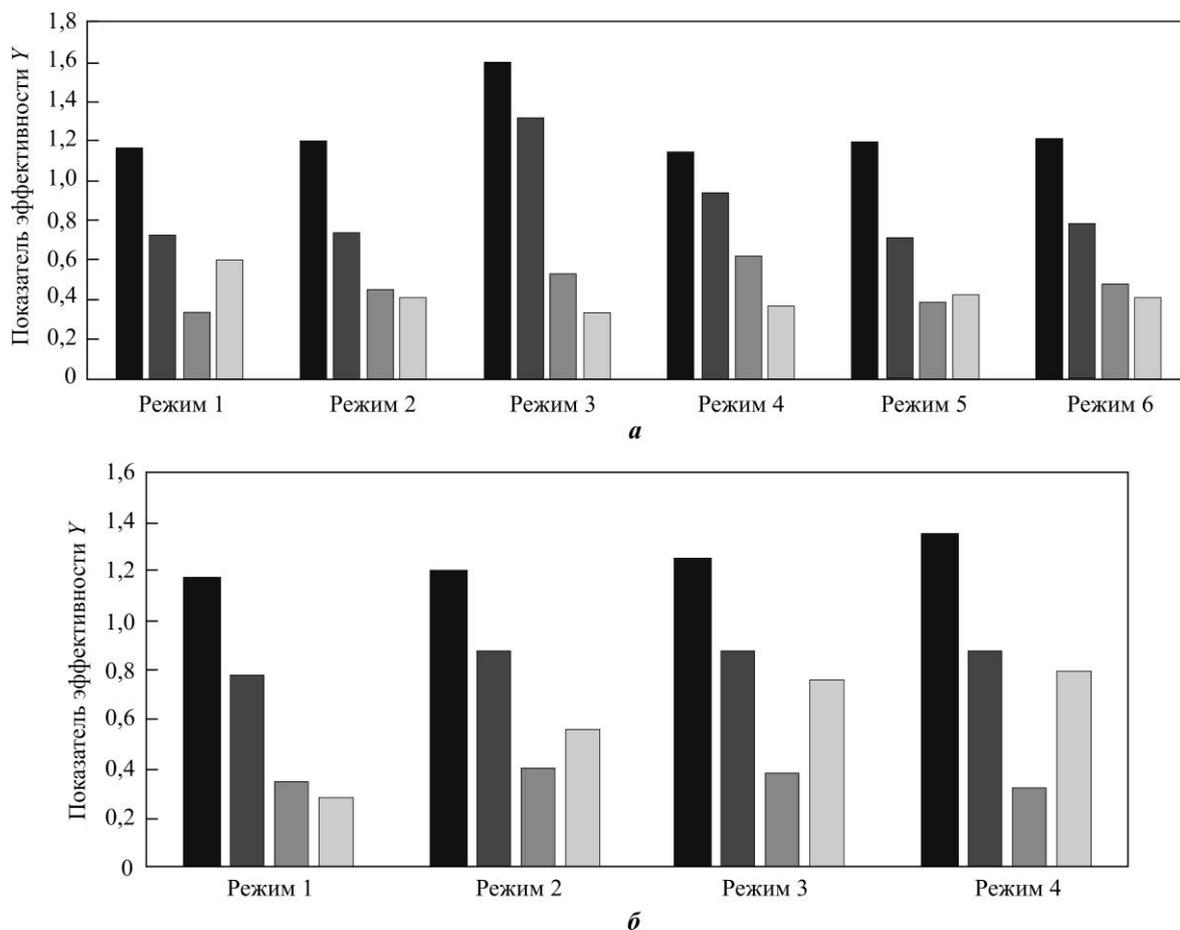


Рис. 2. Показатели эффективности Y работы системы в различных ситуациях на примере аналоговых (а) и цифровых (б) режимов передачи данных: ■ – F_1 ; ■ – F_2 ; ■ – F_3 ; ■ – F_4
 Fig. 2. Performance indicator Y as exemplified by the analogue work options (a) and digital (b) transmission models: ■ – F_1 ; ■ – F_2 ; ■ – F_3 ; ■ – F_4

(безрисковый) режим работы (относительно других режимов). На рис. 2 представлены результаты расчетов показателя эффективности Y работы системы на примере аналоговых [8] и цифровых режимов передачи данных. Обозначим режимы работы E_i .

Как видно из рис. 2, б, наилучшим для начала работы (первая ситуация F_1) является режим 4 (E_4) с $Y = 1,359$. При этом управление частотой приема-передачи будет потреблять все ресурсы. Для второй ситуации (F_2) эффективна работа в режиме 2 (E_2) с $Y = 0,884$. В данном случае ресурсы потребляют управление скоростью приема-передачи и управление частотой. В третьей ситуации (F_3) система продолжает работать в режиме 2 с $Y = 0,408$. Все ресурсы направлены на управление типом сигнально-кодовых конструкций. При наступлении четвертой ситуации (F_4) целесообразнее перейти в режим 4, так как $Y = 0,794$. Данный режим работы потребляет все ресурсы на управление мощностью передатчика.

На рис. 3 представлены результаты расчетов показателя эффективности работы системы Y для цифровых режимов передачи цифровой речи.

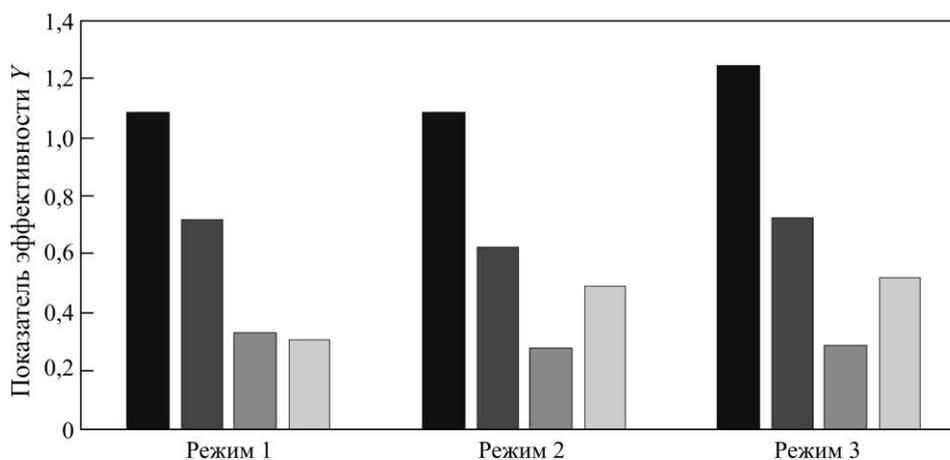


Рис. 3. Показатели эффективности Y работы системы в различных ситуациях при передаче цифровой речи: ■ – F_1 ; ■ – F_2 ; ■ – F_3 ; ■ – F_4

Fig. 3. System performance indicator Y in various digital speech situation:

■ – F_1 ; ■ – F_2 ; ■ – F_3 ; ■ – F_4

Работу, согласно расчетам, следует начинать с режима 3 (E_3), так как $Y = 1,248$, что является наибольшим значением из всех возможных. При возникновении второй ситуации (F_2) систему стоит оставить в режиме 3 с $Y = 0,728$. Для третьей ситуации (F_3) необходимо перевести систему в режим работы 1 (E_1) с $Y = 0,334$. Завершать работу при наступлении четвертой ситуации (F_4) лучше в режиме 3, так как $Y = 0,522$, что является наибольшим значением.

Заключение. Симплекс-метод позволяет рассчитать показатели расхода ресурсов для каждой из четырех возможных ситуаций в аналоговых и цифровых режимах. В результате получены оптимальные режимы работы системы управления. Установлено, что работа системы зависит от пяти параметров управления: мощности приемопередающей аппаратуры, скорости приема-передачи, типа сигнально-кодовых конструкций, несущей частоты и полосы. При изменении этих параметров система может работать эффективнее в одной или нескольких заданных ситуациях.

Материалы статьи доложены на Всероссийской межведомственной научно-технической конференции по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления и связи «Наука и АСУС – 2022» (20 октября 2022 г., Россия, г. Москва, г. Зеленоград).

Литература

1. Айсберг Е. Д. Радио?.. Это очень просто! 2-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Энергия, 1967. 208 с.
2. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2000. 368 с.
3. Ларичев О. И. Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 1979. 200 с.
4. Черноуцкий И. Г. Методы принятия решений: учеб. пособие. СПб.: СПбГПУ, 2012. 318 с.
5. Карачев Е. В., Благодатский Г. А. Методы и инструменты исследования иерархической структуры показателя интеграции интернет-сообществ // Системы компьютерной математики и их приложения. 2020. № 21. С. 283–290.
6. Благодатский Г. А., Копысов А. Н., Хворенков В. В., Батулин И. С. Анализ иерархической модели автоматизированной системы управления параметрами радиолиний когнитивной радиосистемы // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 6. С. 51–67. <https://doi.org/10.24411/2409-5419-2018-10187>
7. Карачев Е. В., Благодатский Г. А. Подходы к автоматизации анализа иерархических систем // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. трудов Всерос. науч.-техн. конф. (г. Ижевск, Россия, 29 мая 2020 г.). Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова, 2020. С. 110–116.

8. Богомазов Р. Ю., Беседин Н. Т. Программа на Delphi для изучения линейного программирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. 2013. № 3. С. 27–35.

9. Шабуров А. С., Журилова Е. Е. Модель выявления каналов утечки информации в автоматизированных системах на основе симплекс-метода // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. № 24. С. 7–19.

Статья поступила в редакцию 17.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 18.01.2023 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Карачев Евгений Васильевич – магистрант кафедры информационных систем Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (Россия, Удмуртская Республика, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 42), evgeshkarach@gmail.com

Благодатский Григорий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (Россия, Удмуртская Республика, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 42), blagodatsky@gmail.com

Смирнов Сергей Витальевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (Россия, Удмуртская Республика, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 42), smiservit@gmail.com

References

1. Aisberg E. *Radio?.. It's very easy!* 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1967. 208 p. (In Russian).
2. Andreychikov A. V., Andreychikova O. N. *Analysis, synthesis, decision planning in economics*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2000. 368 p. (In Russian).
3. Larichev O. I. *Science and art of decision making*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 200 p. (In Russian).
4. Chernorutskiy I. G. *Decision methods, study guide*. St. Petersburg, St. Petersburg State Polytechnic University, 2012. 318 p. (In Russian).
5. Karachev E. V., Blagodatsky G. A. Methods and tools for studying the hierarchical structure of indicators of online communities. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya*, 2020, no. 21, pp. 283–290. (In Russian).
6. Blagodatsky G. A., Kopysov A. N., Khvorenkov V. V., Baturin I. S. Analysis of the hierarchical model of the automated control system of the parameters of the radio lines of the cognitive radio system. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = H&ES Research*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 51–67. (In Russian). <https://doi.org/10.24411/2409-5419-2018-10187>
7. Karachev E. V., Blagodatsky G. A. Approaches to the automation of hierarchical systems analysis. *Informatsionnyye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*, proceedings of Russia-wide research-to-practice conference (Izhevsk, Russia, 29 May 2020). Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 2020, pp. 110–116. (In Russian).
8. Bogomazov R. Y., Besedin N. T. Delphi program for study of linear programming. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika, meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science, Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 3, pp. 27–35. (In Russian).
9. Shaburov A. S., Zhurilova E. E. Models of identification of information leaks channels in automated systems based on the simplex method. *Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya = PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2017, no. 24, pp. 7–19. (In Russian).

The article was submitted 17.11.2022; approved after reviewing 18.01.2023; accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Evgeny V. Karachev – Master's degree student of the Information Systems Department, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov (Russia, Udmurt Republic, 426069, Izhevsk, Studencheskaya st., 42), evgeshkarach@gmail.com

Grigoriy A. Blagodatsky – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Information Systems Department, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov (Russia, Udmurt Republic, 426069, Izhevsk, Studencheskaya st., 42), blagodatsky@gmail.com

Sergey V. Smirnov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Information Systems Department, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov (Russia, Udmurt Republic, 426069, Izhevsk, Studencheskaya st., 42), smiservit@gmail.com

**Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

**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

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.021:004.043
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-2-252-260

Алгоритм индексации объектов рекомендательной системы

М. С. Чипчагов¹, Е. И. Кублик¹, В. А. Попов²

¹ *Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия*

² *Военная академия ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Балашиха, Россия*

MSChipchagov@fa.ru

Аннотация. Предпочтения пользователей системы электронной коммерции прогнозируют специальные рекомендательные алгоритмы, что облегчает принятие решения в выборе предлагаемого продукта. В основе системы электронной коммерции лежит вычислительная система, в которой принципы хранения информации не всегда согласованы с работой рекомендательных алгоритмов. В работе предложен алгоритм создания суррогатного ключа для индексации объектов рекомендательной системы с целью ускорения процесса выборки данных за счет уменьшения числа обращений к носителю информации и сокращения времени выполнения запроса. Ключ обеспечивает ранжирование продуктов на основе пользовательских предпочтений, что делает возможным последовательный доступ к данным и ускорение процесса загрузки самых востребованных товаров. Рассмотрены различные рекомендательные алгоритмы, которые работают со значительными объемами данных. Основными критериями выбора метода для построения суррогатного индекса являются его производительность и способность работать с множеством альтернатив и большим количеством показателей. Для ранжирования объектов рекомендации предложено использовать один из методов многокритериального принятия решений – TOPSIS.

Ключевые слова: суррогатный ключ, рекомендательные системы, алгоритм индексации

Для цитирования: Чипчагов М. С., Кублик Е. И., Попов В. А. Алгоритм индексации объектов рекомендательной системы // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 252–260. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-252-260>

Original article

Algorithm for indexing recommender system objects

M. S. Chipchagov¹, E. I. Kublik¹, V. A. Popov²

¹Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russia

²Military Academy of the Strategic Missile Forces named after
Peter the Great, Balashikha, Russia

MSChipchagov@fa.ru

Abstract. Special recommendation algorithms predict the preferences of e-commerce system users, which facilitate decision making in choosing the proposed product. At the core of the e-commerce system is a computing system in which the principles of information storage are not always optimized for the operation of recommender algorithms. In this work, an algorithm for creating a surrogate key for indexing recommender system objects by popularity level is proposed in order to speed up the data sampling process by reducing the number of accesses to the storage medium and the query runtime. The key ensures that products are ranked based on user preferences, which allows for consistent access to data and faster loading of the most requested products. Various recommender algorithms that work with significant amounts of data are considered. The main criteria for choosing a method for constructing a surrogate index are its performance and ability to work with many alternatives and a large number of indicators. It has been proposed to use one of the TOPSIS multi-criteria decision-making methods to rank recommendation objects.

Keywords: surrogate key, recommender system, indexing algorithm

For citation: Chipchagov M. S., Kublik E. I., Popov V. A. Algorithm for indexing recommender system objects. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 252–260. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-252-260>

Введение. Цифровизация общественных отношений оказывает влияние на рост онлайн-предприятий, особенно электронной коммерции, предоставляющих широкий выбор товаров и услуг потребителю. Огромное разнообразие продуктов одновременно привлекает и дезориентирует пользователей подобных систем. Прогнозируя предпочтения потребителей, рекомендательные алгоритмы облегчают принятие решения при выборе товара или услуги. Главная задача любой рекомендательной системы – информирование пользователей о продуктах. При этом рекомендации могут быть персонализированными и неперсонализированными. Неперсонализированные рекомендации предназначены для сообществ и групп людей. Персонализированные рекомендации прогнозируют предпочтения для каждого отдельного пользователя системы.

Коллаборативная фильтрация является одним из наиболее известных персонализированных методов рекомендаций. Основной принцип этого метода заключается в нахождении для пользователя такого продукта, который нравится похожим на него пользователям системы. Классический алгоритм коллаборативной фильтрации, основанный

на оценке близости пользователей (user-based), состоит из трех этапов. На первом этапе определяется подобие между активным пользователем и всеми пользователями системы. На втором этапе выбираются «пользователи-соседи», которые по своим оценкам наиболее похожи на активного пользователя. На третьем этапе рассчитывается прогноз оценок пользователя для неизвестных ему товаров с учетом весов и оценок «пользователей-соседей» [1]. Другим вариантом коллаборативной фильтрации является модель, основанная на оценке близости объектов рекомендации (item-based). Здесь алгоритм рассчитывает близость товаров, а не пользователей. Данный подход является естественной альтернативой подходу, основанному на оценке близости пользователей.

Одной из альтернатив коллаборативной фильтрации являются рекомендательные алгоритмы, основанные на контенте (content-based filtering). Рекомендательные системы на основе контента опираются на предположение о постоянстве предпочтений пользователя. Задача таких систем сводится к нахождению объектов, похожих на продукты, которые пользователь уже когда-то выбирал, или относящихся к предпочитаемым категориям товаров.

На практике чаще используется гибридный подход (hybrid recommender system), который объединяет различные алгоритмы рекомендаций. Использование одновременно нескольких рекомендательных алгоритмов позволяет достичь более высокой точности рекомендаций [2].

Независимо от выбранного метода в центре любой рекомендательной системы в обобщенном виде находится матрица предпочтений. По одной из осей этой матрицы отложены все пользователи системы, а по другой – объекты рекомендаций. Матрица заполнена оценками заинтересованности пользователя в объекте, нормированными и выраженными по некоторой шкале. Именно эти данные становятся основой в предсказании предпочтений пользователя системы.

Создание алгоритма индексирования объектов рекомендательной системы. Проблема, с которой приходится сталкиваться онлайн-сервисам и системам электронной коммерции, использующим рекомендательные алгоритмы, заключается в разобщенности и несогласованности работы алгоритмов построения рекомендаций и принципов хранения данных о товарах. На рис. 1, а показана общая схема процесса выборки объектов рекомендаций.

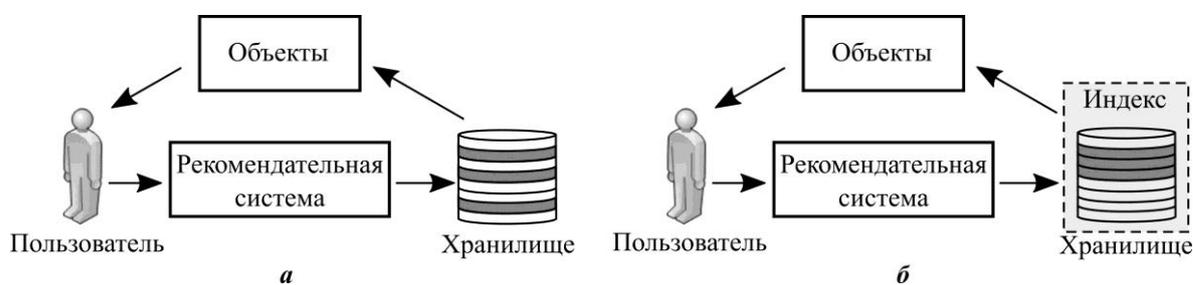


Рис. 1. Схемы процесса выборки объектов рекомендаций (а) и индексированных объектов рекомендаций (б)

Fig. 1. Diagrams of the recommendation objects (a) and indexed recommendation objects (b) sampling process

Каждому пользователю предназначены свои рекомендации, и задача стоит в минимизации времени выборки данных о предлагаемом продукте. Известно, что одним из методов ускорения процесса извлечения данных является их индексация. Цель использования индексов – ускорение процесса выборки данных за счет уменьшения числа обращений к носителю информации. Одним из показателей эффективности индексированного значения данных является его кардинальность. Чем выше кардинальность индексированного значения, тем меньше потенциальный объем операций ввода-вывода для получения результирующих данных запроса. Эффективными считаются индексы по целочисленным значениям. Они позволяют применять древовидные структуры хранения, например В-деревья, обеспечивающие высокую доступность больших объемов данных [3–5].

Вначале для каждого пользователя рекомендательные алгоритмы формулируют предпочтения о перечне товаров. Далее идет поиск информации об этих продуктах в системе хранения данных, которая представляется пользователю в виде рекомендаций. Это происходит для каждого пользователя в системе. Если объем данных о товарах в системе значителен, то поиск рекомендуемых товаров превращается в ресурсоемкий процесс. Необходимо адаптировать структуру хранения данных под запросы рекомендательной системы. Если рассматривать глобально всех пользователей системы и весь набор объектов рекомендаций, то логично предположить, что есть товары, которые пользуются большим спросом, чем все остальные. Предварительное кеширование таких товаров сократит время выгрузки данных о рекомендациях. Для решения этой задачи необходимо ранжировать все предлагаемые в системе товары по степени их предпочтения с точки зрения рекомендательной системы. Активность пользователей системы, выраженная в их рейтинге, также влияет на общую популярность товаров.

Рассмотрим вариант создания суррогатного товарного индекса на основе рекомендаций, отражающих рейтинг пользователей и товаров в системе. Общая схема выборки индексированных объектов рекомендаций представлена на рис. 1, б. Рекомендательные системы онлайн-предприятий часто работают со значительными объемами данных, поэтому основными критериями выбора метода ранжирования объектов рекомендаций для построения суррогатного индекса являются его производительность и способность работать с большим числом альтернатив и показателей. К хорошо известным методам многокритериального ранжирования альтернатив относятся метод анализа иерархий, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE [6] и др.

Метод анализа иерархий является одним из эффективных, однако трудозатратных методов ранжирования альтернатив. Суть метода состоит в многократном попарном сравнении выбранного показателя всех альтернатив.

TOPSIS – метод, разработанный для решения многокритериальных задач [7]. Метод заключается в поиске альтернатив, значения показателей которых наиболее близки к идеально-позитивному решению и максимально удалены от идеально-негативного решения.

Метод VIKOR применяется для ранжирования альтернатив с несоизмеримыми признаками. Суть метода сводится к нахождению компромисса, наиболее близкого решения к идеальному по всем критериям.

ELECTRE – семейство методов многокритериального принятия решений. В основе методов – парное сравнение альтернатив с подсчетом двух индексов: согласия и несогласия. Эти индексы определяют согласие и несогласие с гипотезой, что одна альтернатива превосходит другую альтернативу. Задаются уровни, с которыми сравниваются подсчитанные индексы для каждой пары альтернатив. Из множества альтернатив уда-

ляются доминируемые альтернативы, и далее продолжается сравнение с измененными значениями уровней. Модификации методов ELECTRE отличаются способами расчета индексов согласия и несогласия.

Как показывают проведенные исследования [8–10], для задачи ранжирования большого количества альтернатив со значительным числом показателей достаточно эффективным является метод TOPSIS. Создание суррогатного индекса на основе рекомендаций – это тот случай, когда вариации альтернатив и их признаков очень велики.

Пусть $U = \{u_i\}$ – множество пользователей системы, $A = \{a_j\}$ – множество объектов рекомендаций, $X = (x_{ij})$ – матрица предпочтений. Алгоритм создания суррогатного индекса методом TOPSIS можно представить в виде следующих шагов:

Шаг 1. Заполнение матрицы X нормализованными оценками интереса пользователей к объектам рекомендаций (табл. 1).

Шаг 2. Построение матрицы взвешенных оценок $P = (w_i x_{ij}) = (p_{ij})$, где $w_i \in [0, 1]$ – вес пользователя системы (табл. 2).

Шаг 3. Нахождение идеально-позитивных и идеально-негативных решений (табл. 3):

$$A^+ = (\max p_{ij} | j \in J), J = 1, 2, 3, \dots, n,$$

$$A^- = (\min p_{ij} | j \in J), J = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Шаг 4. Расчет расстояний от альтернатив до идеально-позитивных (табл. 4) и идеально-негативных (табл. 5) решений:

$$S_j^+ = \sqrt{\sum_1^n (p_{ij} - p_j^+)^2}, \quad S_j^- = \sqrt{\sum_1^n (p_{ij} - p_j^-)^2}.$$

Шаг 5. Вычисление сходства с идеально-позитивным решением (табл. 6):

$$C_j^+ = \frac{S_j^-}{S_j^+ + S_j^-}.$$

Шаг 6. Создание суррогатного индекса на основе ранжирования альтернатив (табл. 7).

Таблица 1

Матрица предпочтений

Table 1

Preference matrix

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
U1	0,8	0,6	0	0,6	0	0,2	0,4	0,2
U2	0	0	0,8	0,4	0,4	0,8	0	0,4
U3	0,4	0	1	0,8	1	0	0,6	0,6
U4	0,6	0	0,8	0	1	0	0,4	0,8
U5	0,2	0,4	1	0	0,8	0,6	0,8	0
U6	0	0,8	0,8	0	0	0,2	1	1
U7	0,2	0,2	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 2

Матрица взвешенных оценок

Table 2

Matrix of weighted estimates

	w	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
U1	0,143	0,1143	0,0857	0	0,0857	0	0,0286	0,0571	0,0286
U2	0,143	0	0	0,1143	0,0571	0,0571	0,1143	0	0,0571
U3	0,143	0,0571	0	0,1429	0,1143	0,1429	0	0,0857	0,0857
U4	0,143	0,0857	0	0,1143	0	0,1429	0	0,0571	0,1143
U5	0,143	0,0286	0,0571	0,1429	0	0,1143	0,0857	0,1143	0
U6	0,143	0	0,1143	0,1143	0	0	0,0286	0,1429	0,1429
U7	0,143	0,0286	0,0286	0,0857	0,0286	0,0286	0,0286	0,0286	0,0286

Примечание: вес пользователей одинаковый.

Таблица 3

Идеально-положительные и идеально-негативные решения

Table 3

Ideal-positive and ideal-negative solutions

	A ⁺	A ⁻
U1	0,1143	0
U2	0,1143	0
U3	0,1429	0
U4	0,1429	0
U5	0,1429	0
U6	0,1429	0
U7	0,0857	0,0286

Таблица 4

Расстояние до идеально-положительных решений

Table 4

Distance to ideal-positive solutions

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
S ⁺	0,2458	0,2571	0,1212	0,2634	0,2020	0,2603	0,1761	0,1959

Таблица 5

Расстояние до идеально-негативных решений

Table 5

Distance to ideal-negative solutions

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
S ⁻	0,2458	0,2571	0,1212	0,2634	0,2020	0,2603	0,1761	0,1959

Таблица 6

Сходство с идеально-положительным решением

Table 6

Similarity to ideal-positive solution

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
C ⁺	0,3890	0,3744	0,7042	0,3687	0,5420	0,3632	0,5527	0,5196

Таблица 7

Значения суррогатного ключа

Table 7

Surrogate key values

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
C ⁺	0,3890	0,3744	0,7042	0,3687	0,5420	0,3632	0,5527	0,5196
Key	6	7	1	8	3	9	2	4

Экспериментальная оценка работоспособности алгоритма проведена на открытом наборе данных для изучения рекомендательных систем MovieLens 25M Dataset [11]. Набор данных содержит 25 млн оценок 162 тыс. пользователей для более чем 62 тыс. фильмов, созданных с 1995 по 2019 г. Характеристики аппаратно-программной платформы: CPU – Intel Xeon E5 2678 v3; RAM – 32Gb DDR4; ROM – 1 Tb; ОС – Ubuntu Server 22.04 LTS. В качестве хранилища данных об объектах классификации выбрана документо-ориентированная СУБД MongoDB (версия 5.3). Под каждый фильм из набора данных сформирован отдельный документ коллекции MongoDB. Итоговый объем коллекции составил 62 423 документа.

На основе набора данных оценок пользователей сформирована матрица предпочтений. Пользователи MovieLens не имеют дифференциации, поэтому в эксперименте их вес принят одинаковым. В результате работы алгоритма получен список значений суррогатного ключа для каждого объекта рекомендаций. Суррогатный ключ назначен в качестве кластерного индекса в документах кластерной коллекции MongoDB.

Эксперимент проведен с двумя коллекциями: с кластерным индексом (collectionMoviesIndexed) и без кластерного индекса (collectionMovies).

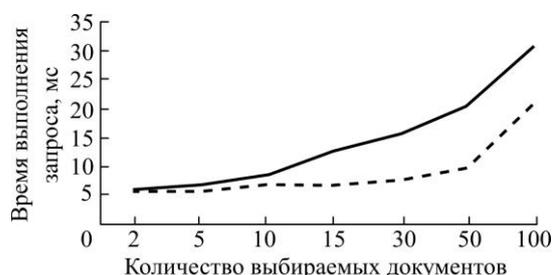


Рис. 2. График времени выполнения запросов: — коллекция с кластерным индексом; --- без кластерного индекса

Fig. 2. The graph of query execution time: — collectionMoviesIndexed; --- collectionMovies

Суть эксперимента – сравнение скорости выполнения запросов выборки документов из базы для пользователей в качестве объектов рекомендаций методом перебора коллекции. На рис. 2 показаны средние значения времени обработки запросов на выборку документов.

Эксперимент показал, что время выполнения запроса зависит от количества выбираемых документов и у кластерной коллекции оно существенно ниже. Замеры проводили для 20 случайных пользователей рекомендательной системы, для которых поочередно выбирали из базы данных от 2 до 100 документов.

Заключение. Предложенный алгоритм создания суррогатного ключа для индексации объектов рекомендательной системы на основе метода TOPSIS позволяет ранжировать товары в системе по уровню их популярности с учетом рейтинга потребителей. Созданный суррогатный ключ снижает время выполнения запроса пользователя и повышает эффективность работы рекомендательной системы.

Материалы статьи доложены на Всероссийской межведомственной научно-технической конференции по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления и связи «Наука и АСУС – 2022» (20 октября 2022 г., Россия, г. Москва, г. Зеленоград).

Литература

1. **Aggarwal C. C.** Recommender systems: the textbook. Cham: Springer, 2016. XXI, 498 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29659-3>
2. Recommender systems handbook / eds **F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira**. 2nd ed. New York: Springer, 2015. XVII, 1003 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7637-6>
3. **Garcia-Molina H., Ullman J. D., Widom J.** Database systems: the complete book. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2008. 1248 p.
4. **Ахо А. В., Хонкрофт Дж. Э., Ульман Дж. Д.** Структуры данных и алгоритмы. М.: Диалектика-Вильямс, 2019. 400 с.
5. **Петров А.** Распределенные данные: Алгоритмы работы современных систем хранения информации / пер. с англ. А. Коцюбы. СПб.: Питер, 2021. 336 с.
6. **Thakkar J. J.** Multi-criteria decision making. Singapore: Springer Nature, 2021. XVII, 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8>
7. **Hwang C.-L., Yoon K.** Multiple attribute decision making: Methods and applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. XI, 269 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
8. **Hezer S., Gelmez E., Özceylan E.** Comparative analysis of TOPSIS, VIKOR and COPRAS methods for the COVID-19 regional safety assessment // J. Infect. Public Health. 2021. Vol. 14. Iss. 6. P. 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.03.003>
9. **Клевец Н. И.** Сравнительный анализ методов многокритериального ранжирования альтернатив // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2018. № 2 (43). С. 153–163.
10. **Yalcin A. S., Kilic H. S., Delen D.** The use of multi-criteria decision-making methods in business analytics: A comprehensive literature review // Technological Forecasting and Social Change. 2022. Vol. 174. Art. No. 121193. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121193>
11. **Vig J., Sen Sh., Riedl J.** The tag genome: Encoding community knowledge to support novel interaction // ACM Trans. Interact. Intell. Syst. 2012. Vol. 2. Iss. 3. Art. No. 13. <https://doi.org/10.1145/2362394.2362395>

Статья поступила в редакцию 04.10.2022 г.; одобрена после рецензирования 19.12.2022 г.; принята к публикации 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Чипчагов Михаил Сергеевич – кандидат технических наук, доцент Департамента анализа данных и машинного обучения Финансового университета при Правительстве Российской Федерации (Россия, 125993, г. Москва, Ленинградский пр-т, 49), MSChipchagov@fa.ru

Кублик Евгений Ильич – кандидат технических наук, доцент Департамента анализа данных и машинного обучения Финансового университета при Правительстве Российской Федерации (Россия, 125993, г. Москва, Ленинградский пр-т, 49), EIKublik@fa.ru

Попов Владимир Александрович – адъюнкт кафедры автоматизированных систем обработки информации специального назначения Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (Россия, 143900, Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, 8), spam@vpopov.su

References

1. Aggarwal C. C. *Recommender systems*, the textbook. Cham, Springer, 2016. xxi, 498 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29659-3>
2. Ricci F., Rokach L., Shapira B., eds. *Recommender systems handbook*. 2nd ed. New York, Springer, 2015. xvii, 1003 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7637-6>
3. Garcia-Molina H., Ullman J. D., Widom J. *Database systems: the complete book*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson Prentice Hall, 2008. 1248 p.

4. Aho A. W., Hopcroft J. E., Ullman J. D. *Data structures and algorithms*. 1st ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 1983. 448 p.
5. Petrov A. *Database internals: A deep dive into how distributed data systems work*. Beijing, Boston, Sebastopol, O'Reilly Media, 2019. 370 p.
6. Thakkar J. J. *Multi-criteria decision making*. Singapore, Springer Nature, 2021. xvii, 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8>
7. Hwang C.-L., Yoon K. *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1981. xi, 269 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
8. Hezer S., Gelmez E., Özceylan E. Comparative analysis of TOPSIS, VIKOR and COPRAS methods for the COVID-19 regional safety assessment. *J. Infect. Public Health*, 2021, vol. 14, iss. 6, pp. 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.03.003>
9. Klepets N. I. Comparative analysis of methods for multi-criteria ranking of alternatives. *Nauchnyy vestnik: finansy, banki, investitsii = Scientific Bulletin: finance, banking, investment*, 2018, no. 2 (43), pp. 153–163. (In Russian).
10. Yalcin A. S., Kilic H. S., Delen D. The use of multi-criteria decision-making methods in business analytics: A comprehensive literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, vol. 174, art. no. 121193. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121193>
11. Vig J., Sen Sh., Riedl J. The tag genome: Encoding community knowledge to support novel interaction. *ACM Trans. Interact. Intell. Syst.*, 2012, vol. 2, iss. 3, art. no. 13. <https://doi.org/10.1145/2362394.2362395>.

The article was submitted 14.12.2022; approved after reviewing 19.12.2022;
accepted for publication 06.02.2023.

Information about the authors

Mihail S. Chipchagov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Data Analysis and Machine Learning Department, Financial University under the Government of the Russian Federation (Russia, 125993, Moscow, Leningradsky ave., 49), MSChipchagov@fa.ru

Evgeny I. Kublik – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Data Analysis and Machine Learning Department, Financial University under the Government of the Russian Federation (Russia, 125993, Moscow, Leningradsky ave., 49), EIKublik@fa.ru

Vladimir A. Popov – Adjunct of the Automated Information Processing Systems for Special Purposes Department, Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great (Russia, 143900, Moscow region, Balashikha, Karbyshev st., 8), spam@vpopov.su

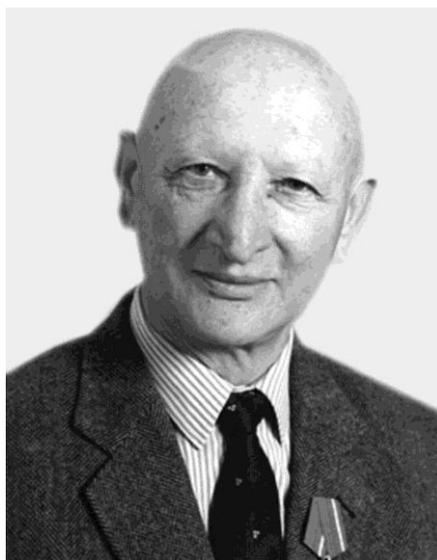
Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

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>

ЮБИЛЕИ

Королёву Михаилу Александровичу – 90 лет



5 марта 2023 г. исполнилось 90 лет известному ученому в области физики и технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Королёву Михаилу Александровичу.

М. А. Королёв в 1957 г. окончил Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева по специальности «Технология электровакуумного и полупроводникового производства». Его трудовая деятельность началась в институте НИИ-35 («Пульсар»), где впервые в СССР стали заниматься разработкой плоскостных полупроводниковых приборов. Затем М. А. Королёв перешел в Институт точной механики и вычислительной техники АН СССР, откуда был приглашен на работу в НИИ молекулярной электроники (г. Зеленоград), где организовал и возглавил отдел по разработке МОП интегральных схем.

С 1971 г. М. А. Королёв стал работать в МИЭТ на кафедре интегральных полупроводниковых схем, которую в то время возглавлял академик К. А. Валиев, и занял должность ведущего преподавателя дисциплин технологического цикла. М. А. Королёв интенсивно занимался научной работой. Под его руководством разработаны оригинальные биполярные схемы на инжекционной логике на основе «обращенных структур», полученные при одновременной диффузии нескольких примесей.

В 1991 г. М. А. Королёв защитил докторскую диссертацию и получил звание профессора. С 1995 по 2007 г. – декан факультета электроники и компьютерных технологий (ЭКТ) (ранее – физико-технический факультет) МИЭТ. С 2007 г. по настоящее время – профессор кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС).

М. А. Королёвым создана научная школа по разработке трехмерных ИС на основе КНИ-структур. Он является основателем нового технологического направления – создание схем на КНИ-структурах, формируемых оригинальным методом использования косвенного лазерного нагрева. На основе исследований разработаны и получены схемы с повышенной радиационной стойкостью, не имеющие аналогов в своем классе. В настоящее время М. А. Королёв активно занимается исследованием одного из новых направлений создания перспективной элементной базы микроэлектроники – беспереходные МОП-транзисторы.

Под руководством М. А. Королёва защищены 5 докторских и 16 кандидатских диссертаций. М. А. Королёв является соавтором 5 монографий, автором более 280 научных работ и 50 изобретений. Под его редакцией и при непосредственном участии подготовлено и издано в МИЭТ около 20 учебных и учебно-методических пособий.

М. А. Королёв проделал большую работу по организации международных учебно-научных центров на факультете ЭКТ и развитию программ магистерской подготовки в области интегральной наноэлектроники.

Михаил Александрович – талантливый педагог, пользуется заслуженным уважением коллег и студентов. Он активный член редколлегии журнала «Известия вузов. Электроника» со дня его основания.

М. А. Королёв – лауреат премии Правительства РФ в области образования (2016), награжден орденом Почета РФ, медалями, знаками «За отличные успехи в работе в высшей школе», «Изобретатель СССР», «Почетный работник электронной промышленности СССР», имеет серебряную медаль ВДНХ, ему присуждено почетное звание «Заслуженный профессор МИЭТ».

Поздравляем Михаила Александровича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, благополучия и выражаем глубокую признательность за значительный вклад в развитие науки!

Редколлегия

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.

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@micee.ru

<http://ivuz-e.ru>