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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 29 | Vol. 29
№ 1 | No. 1
январь – февраль | January – February
2024

Дорогой читатель!

От имени редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника» примите самые теплые поздравления с наступившими праздниками – Новым годом и Рождеством!

В свете стремительного развития информационных технологий и цифровой трансформации общества тема электроники сегодня стала приоритетным направлением в России. Правительство Российской Федерации активно поддерживает разработчиков и производителей отечественной электроники.

Рад сообщить, что в 2023 году по решению Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации журнал «Известия высших учебных заведений. Электроника» отнесен к категории К1 и теперь публикации в нем приравниваются в нашей стране к публикациям в журналах, входящих в международные базы данных.

В наступившем году все научное сообщество ожидает большого события, которое состоится 8 февраля, – это трехсотлетие Российской академии наук. Уверен, что соединение усилий академического сектора науки с усилиями вузовских ученых и специалистов из крупных компаний, связанных с высокими технологиями, даст в будущем значительный эффект.

Редакция по-прежнему ждет статьи и сообщения о практических достижениях и успехах в научной работе и, конечно, приглашает к сотрудничеству молодых ученых, готовых продвигать вперед российскую науку.

Желаю Вам успехов, новых творческих достижений и крепкого здоровья!

Главный редактор
академик РАН *Ю. А. Чаплыгин*



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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 29, № 1, 2024
январь – февраль

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

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
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., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
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)

© «Известия вузов. Электроника», 2024
© МИЭТ, 2024

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада), ORCID: 0000-0003-0974-1262
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орёл, Россия), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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

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

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

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

Подписано в печать 13.02.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 15,345 усл.печ.л., 14,344 уч.-изд.л. Тираж 120 экз. Заказ № 11. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

1.3.5. Физическая электроника (технические науки, физико-математические науки)
1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки, физико-математические науки)
1.3.11. Физика полупроводников (технические науки, физико-математические науки)
1.3.12. Физика магнитных явлений (технические науки, физико-математические науки)
2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)
2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (технические науки, физико-математические науки)
2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки)
2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки),
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

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

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934.
Подписной индекс в каталоге «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» – 47570.

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Шомахов З. В., Налимова С. С., Гукетлов А. М., Кондратьев В. М., Мошников В. А. Управление свойствами адсорбционных центров при формировании газочувствительных структур смешанных оксидов 7

Баглов А. В., Хорошко Л. С., Силибин М. В., Карпинский Д. В. Электронная структура ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ 19

Технологические процессы и маршруты

Румянцев А. В., Боргардт Н. И. Сравнение процессов распыления кремния и диоксида кремния фокусированным ионным пучком 30

Схемотехника и проектирование

Babajanyan H. A., Khudaverdyan S. Kh. Optimization of the audio-frequency voltage-controlled oscillato

(***Бабаджанян А. А., Худавердян С. Х.*** Оптимизация аудиочастотного генератора, управляемого напряжением) 42

Колесников Е. Б. Умножители частоты гармонического сигнала на управляемом фазовращателе 52

Петросянц К. О., Харитонов И. А., Тегин М. С. Моделирование электротепловых переходных процессов в мощных электронных схемах на печатных платах с использованием программного обеспечения Comsol, Spice, «Асоника-ТМ» 65

Микро- и наносистемная техника

Кочурина Е. С., Виноградов А. И., Боев Л. Р., Зарянкин Н. М., Анчутин С. А., Дернов И. С., Тимошенков А. С., Тимошенков С. П. Технологические аспекты изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков удара 79

Борисов А. Г., Ильяшева Е. В., Осипенкова Н. Г. Определение температурной погрешности оптического датчика плотности электролита для аккумуляторов 89

Чугунов Е. Ю., Тимошенков С. П., Погалов А. И. Разработка и исследование многокристальных микросистем на основе модульной трехмерной интеграции кристаллов 98

Биомедицинская электроника

Селютина Е. В., Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Влияние паразитных компонентов и нагрева конденсаторов на адаптивную подстройку усилителя мощности в системе индуктивного питания медицинских имплантатов 108

Информационно-коммуникационные технологии

Лубенцов А. В. Синтез метода оценки эффективности системы информационной безопасности 118

Конференции

XXXI Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием 130

К сведению авторов 131

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 29, No. 1, 2024
January – February

The scientifical and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

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

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2024
© MIET, 2024

Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377
Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)
Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
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@miee.ru, **website:** http://ivuz-e.ru

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

Signed to print 13.02.2024. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 15,345. Number of copies 120. Order no. 11. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

The journal is included into the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of thesis for candidate of science and doctor degrees must be published for the following specialties:

1.3.5. Physical electronics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.8. Condensed matter physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.11. Semiconductor physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.12. Physics of magnetic phenomena (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.1. Vacuum and plasma electronics (Engineering Sciences)
2.2.2. Electronic component base of micro- and nanoelectronics, quantum devices (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.3. Technology and equipment for electronic materials and devices production (Engineering Sciences)
2.2.8. Material, product, substance and natural environment control and diagnostic techniques and devices (Engineering Sciences)
2.3.1. System analysis, information handling and processing (Engineering Sciences)
2.3.3. Process industries automation and control (Engineering Sciences)
2.3.5. Mathware and software for computer systems, complexes and networks (Engineering Sciences)

The journal is included into the Russian Science Citation Index on the Web of Science basis, into the Russian index of scientific citing and into the Rating Science Index. Is the member of Crossref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue "Russian Press" LLC "Agency "Book-Service" – 38934.
The subscription index in catalogue "Periodicals. Newspapers and magazines" LLC "Ural-Press Okrug" – 47570.

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

CONTENTS

Electronics materials

Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Guketlov A. M., Kondratev V. M., Moshnikov V. A. Control of the properties of adsorption sites in the formation of gas-sensitive structures of mixed oxides 7

Baglov A. V., Khoroshko L. S., Silibin M. V., Karpinsky D. V. Electronic structure of bismuth ferromanganite $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ 19

Technological processes and routes

Rumyantsev A. V., Borgardt N. I. Comparison of silicon and silicon dioxide sputtering by a focused ion beam 30

Circuit engineering and design

Babajanyan H. A., Khudaverdyan S. Kh. Optimization of the audio-frequency voltage-controlled oscillator 42

Kolesnikov E. B. Harmonic signal frequency multipliers on controlled phase shifter 52

Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Tegin M. S. Simulation of electro-thermal transient responses in power PCB modules using Comsol, Spice, Asonika-TM 65

Micro- and nanosystem technology

Kochurina E. S., Vinogradov A. I., Boev L. R., Zaryankin N. M., Anchutin S. A., Dernov I. S., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P. Technological aspects of manufacturing sensing elements of micromechanical impact sensors 79

Borisov A. G., Ilyasheva E. V., Osipenkova N. G. Determination of the temperature error of the optical electrolyte density sensor for batteries 89

Chugunov E. Yu., Timoshenkov S. P., Pogalov A. I. Development and research of multichip microsystems based on modular three-dimensional integration of chips 98

Biomedical electronics

Selyutina E. V., Gurov K. O., Mindubaev E. A., Danilov A. A. Parasitic components and capacitors heating impact on power amplifier adaptive tuning in the inductive supply system for medical implants 108

Information-communication technologies

Lubentsov A. V. Synthesis of a method for evaluating the effectiveness of an information security system 118

Conferences

31st All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists with International Participation “Microelectronics and Informatics – 2024”... 130

Instruction for authors 131

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 621.382
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-7-18
EDN: VXLGAQ

Управление свойствами адсорбционных центров при формировании газочувствительных структур смешанных оксидов

З. В. Шомахов[1], С. С. Налимова[2], А. М. Гукетлов[1], В. М. Кондратьев[3,4], В. А. Мошников[2]

[1]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия
[3]Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия
[4]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

shozamir@yandex.ru

Аннотация. Датчики на основе смешанных металлооксидных полупроводников характеризуются быстрым откликом и низким энергопотреблением. В качестве бинарного соединения в таких датчиках широко используется оксид цинка. Газочувствительные структуры на его основе могут быть улучшены при создании близлежащих адсорбционных центров для газа-сенсибилизатора и детектируемого газа. В работе газочувствительные слои на основе наностержней оксида цинка получены гидротермальным методом, а затем модифицированы в растворах, содержащих в качестве прекурсоров станнат калия и сульфат железа, для формирования композитных образцов ZnO-Sn и ZnO-Fe соответственно. С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии проанализировано влияние модификации сенсорных слоев, состоящих из наностержней оксида цинка, при последующей обработке в растворах соединений других металлов (олова и железа) на химический состав поверхности. Проанализированы сенсорные свойства полученных образцов при детектировании паров изопропилового спирта. Обнаружено, что в зависимости от технологических условий изменяется содержание кислорода в виде адсорбированных частиц. В адсорбции таких частиц участвуют кислородные вакансии. Показа-

© З. В. Шомахов, С. С. Налимова, А. М. Гукетлов, В. М. Кондратьев, В. А. Мошников, 2024

но, что газочувствительные свойства зависят от содержания кислородных вакансий. Установлено, что модифицирование сенсорных слоев происходит в процессе формирования композитных поверхностных структур ZnO-Sn и ZnO-Fe и приводит к изменениям распределения адсорбционных центров и их энергетики. Преобразование активных центров адсорбции кислорода и восстанавливающих газов происходит при изменении концентрации вакансий кислорода и приводит к увеличению сенсорного отклика к парам изопропилового спирта.

Ключевые слова: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, газовый сенсор, оксид цинка, гидротермальный синтез, наноструктуры, поверхностные состояния, дефекты

Для цитирования: Управление свойствами адсорбционных центров при формировании газочувствительных структур смешанных оксидов / З. В. Шомахов, С. С. Налимова, А. М. Гукетлов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 7–18. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-7-18. – EDN: VXLGAQ.

Original article

Control of the properties of adsorption sites in the formation of gas-sensitive structures of mixed oxides

Z. V. Shomakhov[1], S. S. Nalimova[2], A. M. Guketlov[1], V. M. Kondratev[3,4], V. A. Moshnikov[2]

[1]Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia
[2]Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia
[3]Alferov University, St. Petersburg, Russia
[4]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

shozamir@yandex.ru

Abstract. Sensors based on mixed metal-oxide semiconductors are characterized by fast response and low energy consumption. In these sensors, zinc oxide is commonly used as binary compound. Gas-sensitive structures based on ZnO can be improved by creation of adjacent adsorption sites for sensitizer gas and target gas. In this work, gas-sensing layers based on zinc oxide nanowires were synthesized by hydrothermal method and then modified in solutions containing precursors – potassium stannate and iron sulfate – to form composite samples of ZnO-Sn and ZnO-Fe, respectively. X-ray photoelectron spectroscopy was used to analyze the effect of modification of sensor layers composed of ZnO nanowires during subsequent processing in solutions of other metal compounds (tin and iron) on the chemical composition of their surface. Sensor properties of the samples were analyzed when detecting isopropyl alcohol vapors. It was found that, depending on the technological conditions, the oxygen content in the form of adsorbed particles changes. Oxygen vacancies participate in the adsorption of such particles. It was demonstrated that the gas-sensitive properties depend on the content of oxygen vacancies. It has been established that the modification of sensor layers takes place with formation of composite surface structures ZnO-Sn and ZnO-Fe and leads to the redistribution of adsorption sites and their energetics. The modification of active surface sites for oxygen and reducing gases adsorption occurs with oxygen vacancies concentration change and leads to increase in the sensor response to isopropyl alcohol vapors.

Keywords: X-ray photoelectron spectroscopy, gas sensor, zinc oxide, hydrothermal synthesis, nanostructures, surface states, defects

For citation: Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Guketlov A. M., Kondratev V. M., Moshnikov V. A. Control of the properties of adsorption sites in the formation of gas-sensitive structures of mixed oxides. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 7–18. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-7-18. – EDN: VXLGAQ.

Введение. Газовые датчики применяются в таких областях, как контроль технологических процессов, мониторинг окружающей среды, медицинская диагностика, безопасность и фармацевтика [1]. Газовые датчики резистивного типа в настоящее время являются одними из наиболее изученных и составляют более 20 % рынка газовых датчиков [2]. Для создания газовых датчиков резистивного типа используются различные бинарные, тройные и более сложные оксиды металлов. Наиболее распространенными оксидами металлов, используемыми в газовых датчиках, являются SnO_2 [3], ZnO [4], TiO_2 [5], WO_3 [6], In_2O_3 [7] и Fe_2O_3 [8].

Датчики на основе смешанных металлоксидных полупроводников характеризуются быстрым откликом и низким энергопотреблением [9, 10]. Одно из широко используемых базовых бинарных соединений – оксид цинка ZnO [11]. К настоящему времени ZnO и методы его синтеза хорошо изучены. Газочувствительные структуры на его основе могут быть улучшены при создании близлежащих адсорбционных центров для газа-сенсибилизатора (кислорода) и детектируемого газа [12]. Поскольку отклик адсорбционного полупроводникового газового сенсора напрямую зависит от удельной площади активной поверхности, то ее увеличение также может привести к значительному улучшению сенсорных свойств. Сочетание перечисленных приемов можно достичь при формировании композитных систем на основе кристаллических наностержней ZnO в виде многокомпонентных оксидов металлов, например Zn-Fe-O. В работе [13] показано, что пористые наностержни $ZnFe_2O_4$ демонстрируют высокую чувствительность и быстродействие при детектировании ацетона. Выявлена возможность селективного обнаружения толуола газовым датчиком на основе монодисперсных наносфер $ZnFe_2O_4$ [14]. Оксидные структуры, содержащие в качестве металлических компонентов олово и цинк ($ZnSnO_3$ и Zn_2SnO_4), также перспективны для использования в газочувствительных датчиках. Установлено, что наностержни Zn_2SnO_4 обладают повышенной чувствительностью и селективностью к NO_2 по сравнению с наностержнями ZnO [15]. Обнаружено улучшение газочувствительных характеристик иерархических гетероструктур Zn_2SnO_4-ZnO по отношению к триэтиламину по сравнению с отдельными нанопроволоками Zn_2SnO_4 и нанопластинками ZnO [16].

Увеличение сенсорного сигнала многокомпонентных оксидов металлов является результатом различных энергетических характеристик разных атомов металла на поверхности [17, 18]. Однако протекающие физико-химические процессы более сложные и могут сопровождаться образованием дополнительных структурных дефектов, например кислородных вакансий, которые известны как центры адсорбции O_2 в заряженном состоянии. Реакции хемосорбированного кислорода с молекулами газа приводят к появлению сенсорного отклика за счет образования свободных электронов и их перехода в зону проводимости материала.

В настоящей работе методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии исследуются адсорбционные центры композитных наноструктур на основе ZnO, полученных при модифицировании оловом и железом.

Эксперимент. В качестве подложек использовали керамические чипы с золотыми контактами. Контакты имеют встречно-штыревую структуру, их ширина и расстояние между ними составляют 25 мкм. Композитные наноструктуры получали в два этапа. Первый этап – формирование наностержней ZnO путем распределения наночастиц с помощью центрифуги с последующим гидротермальным ростом 1D-наноструктур [19]. Второй этап – изготовление композитных систем Zn-Fe-O и Zn-Sn-O. Схематическое изображение чипа с нанесенным на его поверхность сенсорным слоем приведено на рис. 1.

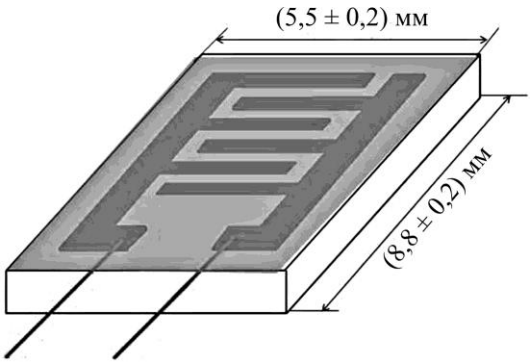


Рис. 1. Схема газочувствительного элемента
Fig. 1. Scheme of gas-sensitive element

Синтез композитных структур Zn-Fe-O проводили на двух идентичных образцах с выращенными наностержнями ZnO путем осаждения из раствора при нормальных условиях. Получены два раствора $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ в дистиллированной воде с различными концентрациями: 0,025 моль/л (ZnO-Fe-1) и 0,05 моль/л (ZnO-Fe-2). Формирование композитной структуры проводили при комнатной температуре в течение 30 мин. После этого образцы высушивали с последующим отжигом в муфельной печи при температуре 500 °C в течение 15 мин. Для формирования наноструктур ZnO-Sn использовали раствор, содержащий 40 % изопропилового спирта и 60 % воды. К 20 мл этого раствора добавляли станнат калия $K_2SnO_3 \cdot 3H_2O$ и мочевину CH_4N_2O. Для образца ZnO-Sn-1 массы станната калия и мочевины составили 28,7 мг и 187 мг соответственно. Для синтеза образца ZnO-Sn-2 в раствор добавляли 14,33 мг станната калия и 93,6 г мочевины. Гидротермальный синтез проводили при температуре 170 °C в течение 30 мин.

Химический состав наностержней ZnO и многокомпонентных оксидных наноструктур изучали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (K-Alpha, Thermo Scientific, США) с использованием излучения AlKα с энергией фотонов $h\nu$ = 1486 эВ. Исследование морфологии поверхности полученных образцов проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе Zeiss Supra 25 (Zeiss, Германия). Для изучения газочувствительных свойств образцов использовали специально разработанную лабораторную установку [20]. Отклик S рассчитывали как отношение сопротивлений образца в воздушной среде и в присутствии паров изопропилового спирта.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 (см. 4-ю с. обложки) приведены РЭМ-изображения морфологии поверхности полученных газочувствительных слоев. В результате модифицирования наностержней ZnO в растворе сульфата железа происходит их частичное растворение и реорганизация с формированием объектов микронного размера, а также иерархической структуры, состоящей из нанообъектов толщиной приблизительно 10 нм и длиной 200–500 нм, расположенных на поверхности в произвольном порядке (рис. 2, *а*, см. 4-ю с. обложки). При гидротермальной обработке наностержней ZnO в растворе станната калия их исходная форма остается неизменной (рис. 2, *б*, см. 4-ю с. обложки). Рисунок подтверждает наличие на поверхности образца наностержней диаметром 100–500 нм и длиной несколько микрометров.

На рис. 3 показаны рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов ZnO-Fe, модифицированных в растворах с концентрациями 0,025 и 0,05 моль/л. Обнаружено, что на спектрах образца ZnO-Fe-2, синтезированного из раствора сульфата железа высокой концентрации (0,05 моль/л), отсутствуют пики, соответствующие энергиям связи атомов цинка. Это может являться результатом образования покрытия из-за избыточного осаждения частиц оксида железа на поверхность параллельно с включением атомов железа в структуру ZnO. Для уменьшения влияния избыточного осаждения оксида железа проводили эксперимент при пониженном содержании железа в прекурсоре. На спектре образца, синтезированного из раствора сульфата железа более низкой концентрации (0,025 моль/л), отчетливо наблюдаются пики кислорода, железа и цинка. Это позволяет сделать вывод, что при данных условиях синтеза формируется композитная структура многокомпонентного оксида металла. Формирование структуры многокомпонентного оксида рассмотрено в работе [4]. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния установлено, что в результате обработки в растворе сульфата железа на поверхности наностержней ZnO образуются фазы $ZnFe_2O_4$ и α-Fe_2O_3.

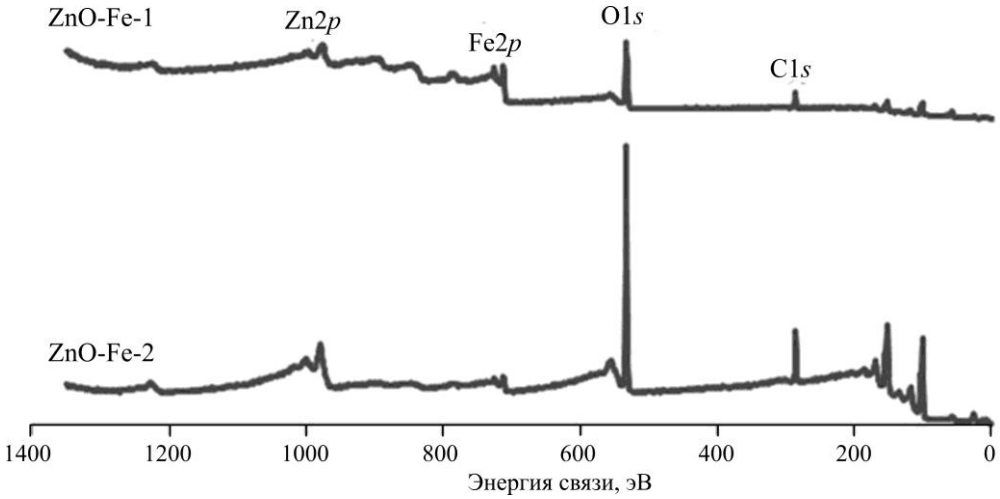


Рис. 3. Обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов ZnO-Fe
Fig. 3. Survey X-ray photoelectron spectra of ZnO-Fe samples

Информацию о составе и энергетике содержат спектры остовных уровней кислорода O1*s* в многокомпонентных оксидных наноструктурах ZnO-Fe (рис. 4). На спектрах наблюдаются два пика, которые соответствуют атомам кислорода кристаллической решетки и вакансиям в подрешетке кислорода. Для образца ZnO-Fe-1 энергии связи составляют 529,9 эВ для кислорода кристаллической решетки и 532,1 эВ для кислородных вакансий. Для образца ZnO-Fe-2 пик кислорода в кристаллической решетке наблюдается при 530 эВ, а пик кислородных вакансий – при 532,4 эВ. Для образца ZnO энергия связи кислорода кристаллической решетки составляет 530,8 эВ, а вакансий в подрешетке кислорода – 532,3 эВ. Таким образом, в результате взаимодействия с атомами железа происходит значительное изменение кристаллической решетки, отражающееся в сдвиге энергии связи кислорода кристаллической решетки. В то же время изменение энергии связи, соответствующее кислородным вакансиям, незначительно. При изменении химического состава наностержней ZnO и формировании композитной структуры ZnO-Fe содержание кислородных вакансий на поверхности значительно увеличивается (48 % для образца ZnO и 68 % для образца ZnO-Fe-1). В образце ZnO-Fe-2 на поверхности наблюдаются преимущественно кислородные вакансии, содержание которых составляет 92 %.

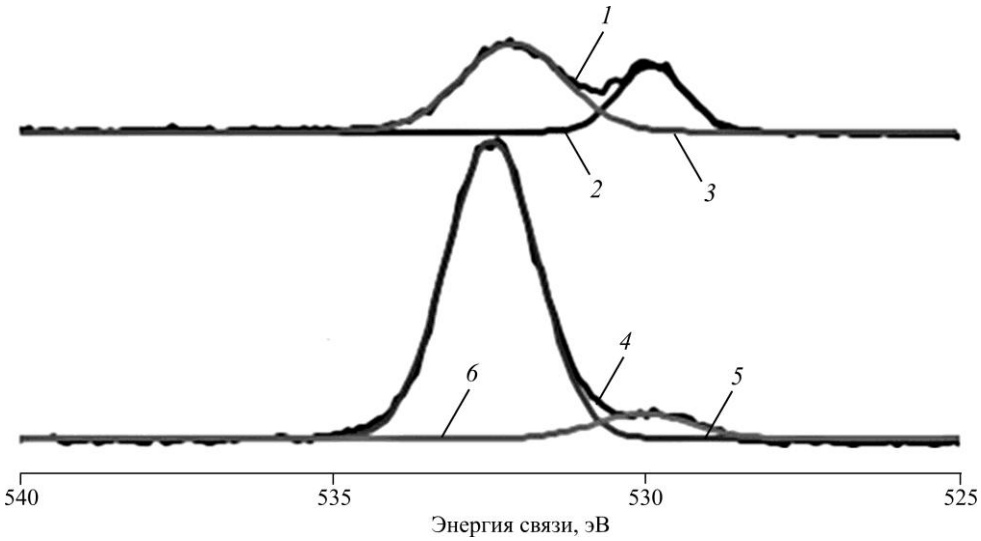


Рис. 4. Спектры остовных уровней кислорода образцов ZnO-Fe-1 и ZnO-Fe-2: *1* – ZnO-Fe-1; *2* – ZnO-Fe-1 O^{2-}; *3* – ZnO-Fe-1 O_V; *4* – ZnO-Fe-2; *5* – ZnO-Fe-2 O_V; *6* – ZnO-Fe-2 O^{2-}
Fig. 4. Spectra of oxygen core levels in ZnO-Fe-1 and ZnO-Fe-2 samples: *1* – ZnO-Fe-1; *2* – ZnO-Fe-1 O^{2-}; *3* – ZnO-Fe-1 O_V; *4* – ZnO-Fe-2; *5* – ZnO-Fe-2 O_V; *6* – ZnO-Fe-2 O^{2-}

Обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов ZnO-Sn-1 и Zn-Sn-2 показаны на рис. 5. Проанализированы заряженные состояния элементов для образца ZnO-Sn-1. Пики, соответствующие уровню Sn3*d*, наблюдаются при 486,6 и 494,9 эВ. Такое положение пиков указывает на состояние Sn^{4+} [21, 22]. Положения максимумов уровня Zn2*p* сместились в сторону более высоких энергий связи (1021,7 и 1045 эВ) относительно структуры ZnO. Несмотря на небольшой сдвиг, заряженное состояние остается – Zn^{2+} [23, 24]. Кислород наблюдается в кристаллической решетке с пиком при энергии связи 530,3 эВ и в виде кислородных вакансий при 531,9 эВ. По сравнению с ZnO пики кислорода также смещены в сторону высоких энергий связи. В образце ZnO-Sn-2 пики олова наблюдаются при 486,4 и 494,8 эВ. Их положения смещены в сторону более низких энергий связи по сравнению с ZnO-Sn-1, состояние остается прежним – Sn^{4+}. Для цинка положение пиков не изменилось.

Проанализированы составляющие спектра уровня O1s для образцов ZnO-Sn (рис. 6). Кислород на поверхности образцов также существует в двух состояниях. Кислород кристаллической решетки имеет энергию связи 530,3 эВ, а адсорбированный кислород имеет энергию связи 531,9 эВ. Пики кислорода ZnO также сместились в сторону высоких энергий связи. При этом содержание адсорбированного кислорода в образце ZnO-Sn-1 составляет 65 %, а в образце ZnO-Sn-2 равно 56 %. Таким образом, по результатам рентгеновской фотоэлектронной микроскопии полученные композитные образцы состоят из оксидов цинка и олова.

Следует отметить, что сенсорный отклик образца ZnO-Fe-1 к 1000 ppm изопропилового спирта при 250 °C составляет 3,42, в то время как для образца исходных наностержней ZnO равен 2,5. Отклик образца ZnO-Fe-2 уменьшился по сравнению с откликом ZnO, что и следовало ожидать, так как вся поверхность образца покрыта слоем избыточного оксида железа. Отклики ZnO-Sn-1 и ZnO-Sn-2 к 1000 ppm изопропилового спирта при 310 °C составили 5,26 и 8,24 соответственно. На рис. 7 показана зависимость отклика образца ZnO-Fe-1 от концентрации паров изопропилового спирта. Сенсорный отклик увеличивается почти линейно с повышением концентрации изопропилового спирта в диапазоне 200–1000 ppm (коэффициент линейности R^2 = 0,946).

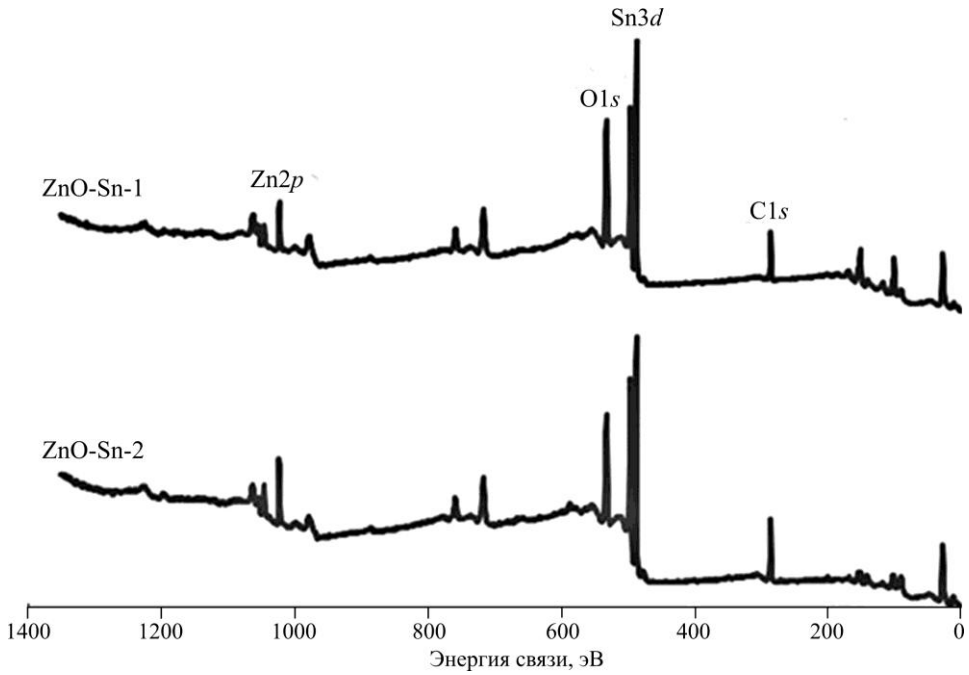


Рис. 5. Обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов ZnO-Sn
Fig. 5. Survey X-ray photoelectron spectra of ZnO-Sn samples

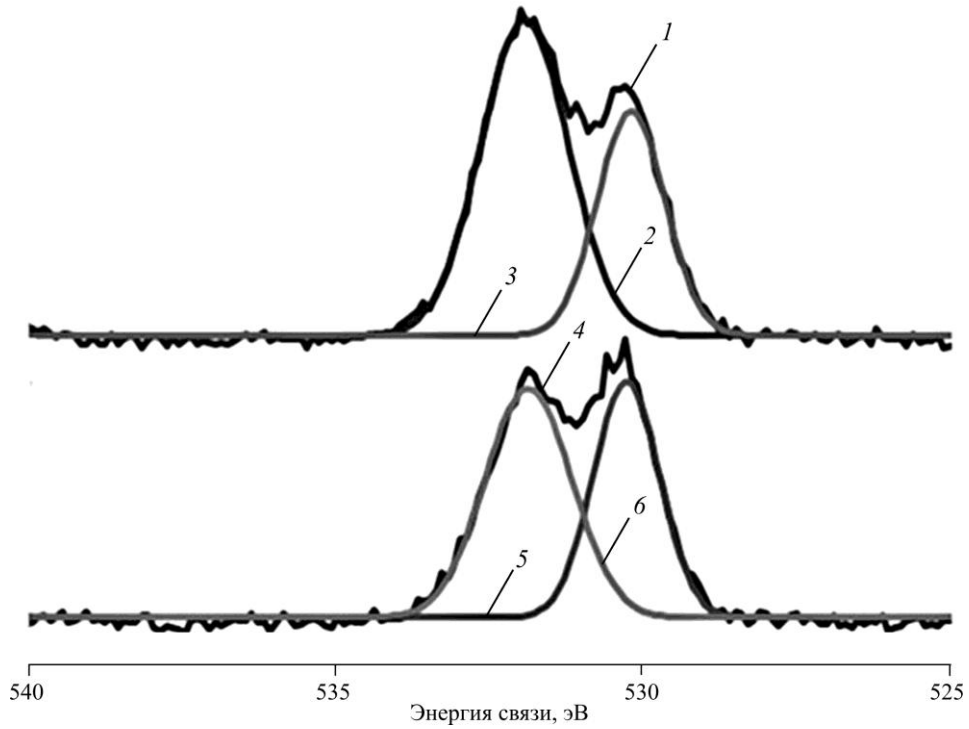


Рис. 6. Спектры остовных уровней кислорода образцов ZnO-Sn-1 и ZnO-Sn-2: *1* – ZnO-Sn-1; *2* – ZnO-Sn-1 O_V; *3* – ZnO-Sn-1 O^{2-}; *4* – ZnO-Sn-2; *5* – ZnO-Sn-2 O^{2-}; *6* – ZnO-Sn-2 O_V
Fig. 6. Spectra of oxygen core levels in ZnO-Sn-1 and ZnO-Sn-2 samples: *1* – ZnO-Sn-1; *2* – ZnO-Sn-1 O_V; *3* – ZnO-Sn-1 O^{2-}; *4* – ZnO-Sn-2; *5* – ZnO-Sn-2 O^{2-}; *6* – ZnO-Sn-2 O_V

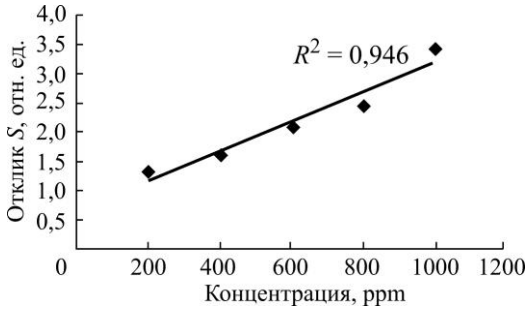


Рис. 7. Зависимость сенсорного сигнала образца ZnO-Fe-1 от концентрации паров изопропилового спирта

Fig. 7. The dependence of the sensor signal of ZnO-Fe-1 on the concentration of isopropyl alcohol

Для всех исследованных многокомпонентных оксидных наноструктур наблюдается увеличение сенсорного сигнала по сравнению с наностержнями ZnO. Улучшение свойств датчика связано с влиянием кислородных вакансий на процессы взаимодействия поверхности оксида с молекулами газа [25, 26]. Наличие вакансий в подрешетке кислорода приводит к модуляции свойств оксидов, что повышает газочувствительные характеристики хеморезистивного датчика. Обычно они действуют как доноры электронов и определяют плотность носителей заряда полупроводниковых оксидных материалов, что связано с большим количеством локализованных электронов. На границе раздела фаз наличие вакансий в подрешетке кислорода способствует адсорбции молекул O_2 и повышению концентрации заряженного кислорода на поверхности [27]. Кроме того, молекулы газа могут адсорбироваться на таких вакансиях, которые являются активными центрами этого процесса [28]. Поэтому для улучшения сенсорных характеристик одним из подходов является управление содержанием центров адсорбции молекул газа-сенсибилизатора кислорода и восстанавливающих газов.

Заключение. Исследования показали, что применение смешанных оксидов цинк / железо и цинк / олово повышает чувствительность многокомпонентных материалов. Это связано с формированием на их поверхности повышенной концентрации новых активных центров взаимодействия с кислородом и восстанавливающими газами. С помощью реализованной методики образования дополнительных кислородных вакансий в результате взаимодействия с прекурсорами установлено, что содержание центров адсорбции может зависеть от условий получения и обработки и, прежде всего, от состава прекурсоров.

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

Литература

1. Resistive gas sensors based on metal-oxide nanowires / ***A. Mirzaei, J.-H. Lee, S. M. Majhi et al.*** // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. Iss. 24. Art. ID: 241102. https://doi.org/10.1063/1.5118805

2. MOF-based membrane encapsulated ZnO nanowires for enhanced gas sensor selectivity / ***M. Drobek, J.-H. Kim, M. Bechelany et al.*** // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. Vol. 8. Iss. 13. P. 8323–8328. https://doi.org/10.1021/acsami.5b12062

3. Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes / ***I. E. Gracheva, V. A. Moshnikov, E. V. Maraeva et al.*** // Journal of Non-Crystalline Solids. 2012. Vol. 358. Iss. 2. P. 433–439. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.020

4. Synthesis and study of gas sensitive $ZnFe_2O_4$-modified ZnO nanowires / ***K. Aubekerov, K. N. Punegova, R. Sergeenko et al.*** // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. Vol. 2227. Art. No. 012014. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2227/1/012014

5. Gas sensors based on TiO_2 nanostructured materials for the detection of hazardous gases: A review / ***X. Tian, X. Cui, T. Lai et al.*** // Nano Materials Science. 2021. Vol. 3. Iss. 4. P. 390–403. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.05.011

6. Sea urchins-like WO_3 as a material for resistive acetone gas sensors / ***Q. Wang, X. Cheng, Y. Wang et al.*** // Sensors and Actuators B. 2022. Vol. 355. Iss. 15. Art. ID: 131262. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131262

7. A novel design and fabrication of self-heated In_2O_3 nanowire gas sensor on glass for ethanol detection / ***D. N. Son, C. M. Hung, D. T. T. Le et al.*** // Sensors and Actuators A. 2022. Vol. 345. Art. ID: 113769. https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113769

8. Superior detection and classification of ethanol and acetone using 3D ultra-porous γ-Fe_2O_3 nanocubes-based sensor / ***H. V. M. Hai, N. D. Cuong, H. D. Mai et al.*** // Sensors and Actuators B. 2022. Vol. 362. Art. ID: 131737. https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131737

9. ***Mahajan S., Jagtap S.*** Metal-oxide semiconductors for carbon monoxide (CO) gas sensing: A review // Appl. Mater. Today. 2020. Vol. 18. Art. ID: 100483. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100483

10. ***Mirzaei A., Kim S. S., Kim H. W.*** Resistance-based H_2S gas sensors using metal oxide nanostructures: A review of recent advances // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 357. P. 314–331. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.015

11. The multisensor array based on grown-on-chip zinc oxide nanorod network for selective discrimination of alcohol vapors at sub-ppm range / ***A. Bobkov, A. Varezhnikov, I. Plugin et al.*** // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 19. Art. No. 4265. https://doi.org/10.3390/s19194265

12. Flexible resistive NO_2 gas sensor of three-dimensional crumpled MXene $Ti_3C_2T_x$/ZnO spheres for room temperature application / ***Z. Yang, L. Jiang, J. Wang et al.*** // Sensors and Actuators B. 2021. Vol. 326. Art. ID: 128828. https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128828

13. ***Li L., Tan J., Dun M., Huang X.*** Porous $ZnFe_2O_4$ nanorods with net-worked nanostructure for highly sensor response and fast response acetone gas sensor // Sensors and Actuators B. 2017. Vol. 248. P. 85–91. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.03.119

14. Monodisperse $ZnFe_2O_4$ nanospheres synthesized by a nonaqueous route for a highly selective low-ppm-level toluene gas sensor / ***C. Dong, X. Liu, X. Xiao et al.*** // Sensors and Actuators B. 2017. Vol. 239. P. 1231–1236. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.122

15. Comparative effects of synthesis parameters on the NO_2 gas-sensing performance of on-chip grown ZnO and Zn_2SnO_4 nanowire sensors / ***C. M. Hung, H. V. Phuong, N. V. Duy et al.*** // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 765. P. 1237–1242. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.184

16. Fabrication of 1D Zn_2SnO_4 nanowire and 2D ZnO nanosheet hybrid hierarchical structures for use in triethylamine gas sensors / ***F. Liu, X. Chen, X. Wang et al.*** // Sensors and Actuators B. 2019. Vol. 291. P. 155–163. https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.04.009

17. ***Карпова С. С., Мошников В. А., Мякин С. В., Коловангина Е. С.*** Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства ZnO, Fe_2O_3 и $ZnFe_2O_4$ // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 3. С. 369–372. EDN: RCQWTN.

18. Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe_2O_3 и $ZnFe_2O_4$ на их газочувствительность по отношению к парам этанола / ***С. С. Карпова, В. А. Мошников, А. И. Максимов и др.*** // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 8. С. 1022–1026. EDN: RCQYRN.

19. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации / ***А. А. Рябко, А. А. Бобков, С. С. Налимова и др.*** // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 5. С. 758–764. https://doi.org/10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21. – EDN: TIVCHQ.

20. ***Anikina M. A., Ryabko A. A., Nalimova S. S., Maximov A. I.*** Synthesis and study of zinc oxide nanorods for semiconductor adsorption gas sensors // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1851. Art. No. 012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1851/1/012010

21. Исследование микроструктуры и состава модифицированных наночастицами серебра слоев диоксида олова / ***З. В. Шомахов, С. С. Налимова, Р. М. Калмыков и др.*** // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. № 13. С. 447–456. https://doi.org/10.26456/pcascnn/2021.13.447. – EDN: UHEPLU.

22. High sensitivity and low detection limit of acetone sensor based on NiO/Zn_2SnO_4 p-n heterojunction octahedrons / ***C. Zhou, F. Meng, K. Chen et al.*** // Sensors and Actuators B. 2021. Vol. 339. Art. ID: 129912. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129912

23. ***Sahu K., Bisht A., Kuriakose S., Mohapatra S.*** Two-dimensional CuO-ZnO nanohybrids with enhanced photocatalytic performance for removal of pollutants // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2020. Vol. 137. Art. ID: 109223. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.109223

24. ***Zheng J. H., Jiang Q., Lian J. S.*** Synthesis and optical properties of flower-like ZnO nanorods by thermal evaporation method // Applied Surface Science. 2011. Vol. 257. Iss. 11. P. 5083–5087. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.025

25. ZnO/Ti_3C_2 composite with oxygen vacancies and Schottky barrier for effective detection of ppb-level NO_2 at room temperature / ***S. Liu, M. Wang, C. Ge et al.*** // Applied Surface Science. 2023. Vol. 610. Art. ID: 155440. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155440

26. Gas sensing enhancing mechanism via doping-induced oxygen vacancies for gas sensors based on indium tin oxide nanotubes / ***J. Y. Zhou, J. L. Bai, H. Zhao et al.*** // Sensors and Actuators B. 2018. Vol. 265. P. 273–284. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.008

27. Влияние дефектов структуры поверхности наностержней оксида цинка на их газочувствительные свойства / ***З. В. Шомахов, С. С. Налимова, К. Аубекеров и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 571–580. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-571-580. – EDN: FYLVFG.

28. Visible light-induced room-temperature formaldehyde gas sensor based on porous three-dimensional ZnO nanorod clusters with rich oxygen vacancies / ***B. Zhang, J. Wang, Q. Wei et al.*** // ACS Omega. 2022. Vol. 7. Iss. 26. P. 22861−22871. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02613

Статья поступила в редакцию 02.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.06.2023 г.; принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Шомахов Замир Валериевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), shozamir@yandex.ru

Налимова Светлана Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), sskarpova@list.ru

Гукетлов Аслан Мухамедович – стажер-исследователь Научно-технологического центра микроэлектроники и нанотехнологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), guketlovaslan3@gmail.com

Кондратьев Валерий Михайлович – младший научный сотрудник Центра фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) (Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9), инженер лаборатории оптики гетерогенных структур и оптических материалов Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, литер А), kondratev.vm@mipt.ru

Мошников Вячеслав Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), vamoshnikov@mail.ru

References

1. Mirzaei A., Lee J.-H., Majhi S. M., Weber M., Bechelany M., Kim H. W., Kim S. S. Resistive gas sensors based on metal-oxide nanowires. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, iss. 24, art. ID: 241102. https://doi.org/10.1063/1.5118805

2. Drobek M., Kim J.-H., Bechelany M., Vallicari C., Julbe A., Kim S. S. MOF-based membrane encapsulated ZnO nanowires for enhanced gas sensor selectivity. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, vol. 8, iss. 13, pp. 8323–8328. https://doi.org/10.1021/acsami.5b12062

3. Gracheva I. E., Moshnikov V. A., Maraeva E. V., Karpova S. S., Alexsandrova O. A., Alekseyev N. I., Kuznetsov V. V., Olchowik G. et al. Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, iss. 2, pp. 433–439. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.020

4. Aubekerov K., Punegova K. N., Sergeenko R., Kuznetsov A., Kondratev V. M., Kadinskaya S. A., Nalimova S. S., Moshnikov V. A. Synthesis and study of gas sensitive $ZnFe_2O_4$-modified ZnO nanowires. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2227, art. no. 012014. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2227/1/012014

5. Tian X., Cui X., Lai T., Ren J., Yang Z., Xiao M., Wang B., Xiao X., Wang Y. Gas sensors based on TiO_2 nanostructured materials for the detection of hazardous gases: A review. *Nano Materials Science*, 2021, vol. 3, iss. 4, pp. 390–403. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.05.011

6. Wang Q., Cheng X., Wang Y., Yang Y., Su Q., Li J., An B., Luo Y. et al. Sea urchins-like WO_3 as a material for resistive acetone gas sensors. *Sensors and Actuators B*, 2022, vol. 355, iss. 15, art. ID: 131262. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131262

7. Son D. N., Hung C. M., Le D. T. T., Xuan C. T., Duy N. V., Dich N. Q., Nguyen H., Hieu N. V., Hoa N. D. A novel design and fabrication of self-heated In_2O_3 nanowire gas sensor on glass for ethanol detection. *Sensors and Actuators A*, 2022, vol. 345, art. ID: 113769. https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113769

8. Hai H. V. M., Cuong N. D., Mai H. D., Long H. T., Phuong T. Q., Dang T. K., Thong L. V., Viet N. N., Hieu N. V. Superior detection and classification of ethanol and acetone using 3D ultra-porous γ-Fe_2O_3 nanocubes-based sensor. *Sensors and Actuators B*, 2022, vol. 362, art. ID: 131737. https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131737

9. Mahajan S., Jagtap S. Metal-oxide semiconductors for carbon monoxide (CO) gas sensing: A review. *Appl. Mater. Today*, 2020, vol. 18, art. ID: 100483. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100483

10. Mirzaei A., Kim S. S., Kim H. W. Resistance-based H_2S gas sensors using metal oxide nanostructures: A review of recent advances. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, vol. 357, pp. 314–331. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.015

11. Bobkov A., Varezhnikov A., Plugin I., Fedorov F. S., Trouillet V., Geckle U., Sommer M., Goffman V. et al. The multisensor array based on grown-on-chip zinc oxide nanorod network for selective discrimination of alcohol vapors at sub-ppm range. *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 19, art. no. 4265. https://doi.org/10.3390/s19194265

12. Yang Z., Jiang L., Wang J., Liu F., He J., Liu A., Lv S., You R. et al. Flexible resistive NO_2 gas sensor of three-dimensional crumpled MXene $Ti_3C_2T_x$/ZnO spheres for room temperature application. *Sensors and Actuators B*, 2021, vol. 326, art. ID: 128828. https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128828

13. Li L., Tan J., Dun M., Huang X. Porous $ZnFe_2O_4$ nanorods with net-worked nanostructure for highly sensor response and fast response acetone gas sensor. *Sensors and Actuators B*, 2017, vol. 248, pp. 85–91. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.03.119

14. Dong C., Liu X., Xiao X., Du S., Wang Y. Monodisperse $ZnFe_2O_4$ nanospheres synthesized by a nonaqueous route for a highly selective low-ppm-level toluene gas sensor. *Sensors and Actuators B*, 2017, vol. 239, pp. 1231–1236. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.122

15. Hung C. M., Phuong H. V., Duy N. V., Hoa N. D., Hieu N. V. Comparative effects of synthesis parameters on the NO_2 gas-sensing performance of on-chip grown ZnO and Zn_2SnO_4 nanowire sensors. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 765, pp. 1237–1242. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.184

16. Liu F., Chen X., Wang X., Han Y., Song X., Tian J., He X., Cui H. Fabrication of 1D Zn_2SnO_4 nanowire and 2D ZnO nanosheet hybrid hierarchical structures for use in triethylamine gas sensors. *Sensors and Actuators B*, 2019, vol. 291, pp. 155–163. https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.04.009

17. Karpova S. S., Moshnikov V. A., Mjakin S. V., Kolovangina E. S. Surface functional composition and sensor properties of ZnO, Fe_2O_3, and $ZnFe_2O_4$. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 3, pp. 392–395. https://doi.org/10.1134/S1063782613030123

18. Karpova S. S., Moshnikov V. A., Maksimov A. I., Mjakin S. V., Kazantseva N. E. Study of the effect of the acid-base surface properties of ZnO, Fe_2O_3 and $ZnFe_2O_4$ oxides on their gas sensitivity to ethanol vapor. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 8, pp. 1026–1030. https://doi.org/10.1134/S1063782613080095

19. Ryabko A. A., Bobkov A. A., Nalimova S. S., Maksimov A. I., Levitskii V. S., Moshnikov V. A., Terukov E. I. Gas sensitivity of nanostructured coatings based on zinc oxide nanorods under combined activation. *ZhTF = Technical Physics*, 2022, vol. 67, no. 5, pp. 644–649. https://doi.org/10.21883/TP.2022.05.53683.314-2

20. Anikina M. A., Ryabko A. A., Nalimova S. S., Maximov A. I. Synthesis and study of zinc oxide nanorods for semiconductor adsorption gas sensors. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1851, art. no. 012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1851/1/012010

21. Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Kalmykov R. M., Aubekerov K., Moshnikov V. A. Study of the microstructure and composition of tin dioxide layers modified by silver nanoparticles. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov = Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2021, no. 13, pp. 447–456. (In Russian). https://doi.org/10.26456/pcascnn/2021.13.447. – EDN: UHEPLU.

22. Zhou C., Meng F., Chen K., Yang X., Wang T., Sun P., Liu F., Yan X. et al. High sensitivity and low detection limit of acetone sensor based on NiO/Zn_2SnO_4 p-n heterojunction octahedrons. *Sensors and Actuators B*, 2021, vol. 339, art. ID: 129912. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129912

23. Sahu K., Bisht A., Kuriakose S., Mohapatra S. Two-dimensional CuO-ZnO nanohybrids with enhanced photocatalytic performance for removal of pollutants. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2020, vol. 137, art. ID: 109223. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.109223

24. Zheng J. H., Jiang Q., Lian J. S. Synthesis and optical properties of flower-like ZnO nanorods by thermal evaporation method. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, iss. 11, pp. 5083–5087. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.025

25. Liu S., Wang M., Ge C., Zhang X., Lei S., Hussain S., Wang M., Qiao G., Liu G. ZnO/Ti_3C_2 composite with oxygen vacancies and Schottky barrier for effective detection of ppb-level NO_2 at room temperature. *Applied Surface Science*, 2023, vol. 610, art. ID: 155440. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155440

26. Zhou J. Y., Bai J. L., Zhao H., Yang Z. Y., Gu X. Y., Huang B. Y., Zhao C. H., Cairang L. et al. Gas sensing enhancing mechanism via doping-induced oxygen vacancies for gas sensors based on indium tin oxide nanotubes. *Sensors and Actuators B*, 2018, vol. 265, pp. 273–284. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.008

27. Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Aubekerov K., Guketlov A. M., Moshnikov V. A. Effect of surface structure defects of zinc oxide nanowires on their gas-sensitive properties. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 571–580. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-571-580. – EDN: FYLVFG.

28. Zhang B., Wang J., Wei Q., Yu P., Zhang S., Xu Y., Dong Y., Ni Y. et al. Visible light-induced room-temperature formaldehyde gas sensor based on porous three-dimensional ZnO nanorod clusters with rich oxygen vacancies. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, iss. 26, pp. 22861−22871. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02613

The article was submitted 02.05.2023; approved after reviewing 23.06.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Zamir V. Shomakhov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), shozamir@yandex.ru

Svetlana S. Nalimova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376,
St. Petersburg, Professor Popov st., 5), sskarpova@list.ru.

Aslan M. Guketlov – Intern Researcher of the Scientific and Technological Center of Microelectronics and Nanotechnology, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), guketlovaslan3@gmail.com

Valeriy M. Kondratev – Junior Researcher of the Center for Photonics and Two-dimensional Materials, Moscow Institute of Physics and Technology (Russia, 141701, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9), Engineer of the Laboratory of Optics of Heterogeneous Structures and Optical Materials of the Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences (194021, St. Petersburg, Khlopina str., 8, building 3, letter A), kondratev.vm@mipt.ru

Vyacheslav A. Moshnikov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, St. Petersburg, Professor Popov st., 5), vamoshnikov@mail.ru

Научная статья
УДК 544.225.22/.23+544.183.24/.25:538.911+538.615
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-19-29
EDN: YTGJJM

Электронная структура ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$

***А. В. Баглов*[1,2], *Л. С. Хорошко*[1,2], *М. В. Силибин*[3], *Д. В. Карпинский*[3,4]**

[1]*Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь*
[2]*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь*
[3]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[4]*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь*

baglov@bsu.by

Аннотация. Мультиферроики на основе сложных оксидов переходных металлов, в частности ферроманганит висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$, являются перспективными функциональными материалами для использования в различных электротехнических устройствах. Однако в научной литературе отсутствует информация о систематическом исследовании твердого раствора $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$. В работе методами из первых принципов исследована модельная структура ромбоэдрического $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$. Проведены теоретические оценки эффективного магнитного момента, степени локализации 3*d*-состояний и ширины энергетической щели для разных спиновых конфигураций ионов железа и марганца. Выявлен характер обменных взаимодействий между ионами переходных металлов. Установлено, что в антиферромагнитном упорядочении магнитные моменты ионов железа и марганца близки и составляют 4,16 и 4,23 $\mu_Б$ соответственно, при этом 3*d*-состояния ионов железа локализованы, а 3*d*-состояния ионов марганца, наоборот, делокализованы и асимметричны. Показано наличие малого результирующего момента, равного 0,012 $\mu_Б$, на элементарную ячейку, обусловленного неэквивалентностью позиций ионов железа и марганца, приводящей к формированию энергетической щели шириной 1,28 и 1,48 эВ для каналов со спином вниз и вверх соответственно. Полученные для модельной структуры результаты позволяют качественно описать электронную структуру орторомбического $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ при четырехкратно редуцированном по сравнению с ним числе ионов и в значительной степени расширяют имеющиеся сведения о структуре и физических свойствах твердых растворов $BiFeO_3$-$BiMnO_3$, полученных экспериментальными методами.

Ключевые слова: ферроманганиты, мультиферроики, теория функционала плотности, теория псевдопотенциала, плотность состояний, заселенность атомных орбиталей

© А. В. Баглов, Л. С. Хорошко, М. В. Силибин, Д. В. Карпинский, 2024

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 21-19-00386) и ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг. в рамках НИР 4 задания № 2.17 подпрограммы «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)».

Для цитирования: Баглов А. В., Хорошко Л. С., Силибин М. В., Карпинский Д. В. Электронная структура ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 19–29. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-19-29. – EDN: YTGJJM.

Original article

Electronic structure of bismuth ferromanganite $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$

A. V. Baglov[1,2], L. S. Khoroshko[1,2], M. V. Silibin[3], D. V. Karpinsky[3,4]

[1]Belarusian State University, Minsk, Belarus
[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus
[3]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[4]Scientific Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

baglov@bsu.by

Abstract. Multiferroics based on multiple oxides of transition metals, particularly ferromanganite $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$, are promising functional materials for use in various electrical devices. However, in research literature there are no information about systematic studies of $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ solid solution. In this work, the model structure of rhombohedral $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ was studied using first-principles methods. Theoretical estimations of the effective magnetic moments of the iron and manganese ions, the degree of localization of the 3*d* states of these ions and the energy gap for different spin configurations of Fe and Mn ions were performed. The nature of the exchange interactions between the transition metal ions was clarified. It has been established that in the antiferromagnetic ordering, the magnetic moments of the iron and manganese ions are very close and have the values of 4.16 and 4.23 μ_B, respectively, herein the 3*d* states of the Fe ions are localized, while the 3*d* states of the Mn ions, on the contrary, are delocalized and asymmetric. The presence of a small resulting magnetic moment of 0.012 μ_B per unit cell is shown. The nonequivalence of the positions of the Fe and Mn ions leading to the formation of an energy gap of 1.28 and 1.48 eV for spin down and spin up channels respectively has been substantiated. The results obtained for the model structure make it possible to describe qualitatively the electronic structure of orthorhombic $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ using a fourfold reduced number of ions as compared to its real structure, and significantly broaden the scope of information obtained by experimental methods on the structure and physical properties of $BiFeO_3$-$BiMnO_3$ solid solutions.

Keywords: ferromanganites, multiferroics, density functional theory, pseudopotential theory, states density, atomic orbitals population

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-19-00386) and the State Research Institute "Materials Science, New Materials and Technologies" for 2021–2025 within the framework of R&D 4 task no. 2.17 of the subprogram "Nanostructural materials, nanotechnologies, nanotechnology ('Nanostructure')".

For citation: Baglov A. V., Khoroshko L. S., Silibin M. V., Karpinsky D. V. Electronic structure of bismuth ferromanganite $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 19–29. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2024-29-1-19-29. – EDN: YTGJJM.

Введение. Мультиферроики сочетают в себе сегнетоэлектрическое и ферромагнитное упорядочение, имеют широкий диапазон физических свойств, что делает их перспективным материалом для использования в различных электротехнических устройствах, таких как датчики электромагнитного поля, пьезоэлектрические актуаторы, устройства и приборы, основанные на магнитоэлектрическом взаимодействии [1–8]. Наиболее исследованы химические соединения на основе оксидов висмута и оксидов переходных элементов, в частности манганит висмута $BiMnO_3$ и феррит висмута $BiFeO_3$. Однофазный мультиферроик $BiFeO_3$ характеризуется высокой температурой как магнитного (точка Нееля – 650 К), так и сегнетоэлектрического (точка Кюри – 1100 К) переходов, а также антиферромагнитным упорядочением *G*-типа [1, 4, 9]. Данное упорядочение, наблюдаемое в нормальных условиях, может быть нарушено воздействием приложенного магнитного поля и химической модификацией (замещение ионов железа другими магнитными или немагнитными ионами) или их комбинированным влиянием [9–13]. Мультиферроик $BiMnO_3$ характеризуется ферромагнитным упорядочением (точка Кюри – 475 К), обусловленным орбитальным порядком ионов Mn^{3+} и зависящим от длины связей и валентного угла в цепочках Mn–O–Mn. Ключевую роль в формировании магнитного порядка посредством сверхобменного механизма играют ионы марганца, разрушение сегнетоэлектрического упорядочения происходит при температуре 770 К и сопровождается структурным переходом от моноклинной сингонии к орторомбической [14–16].

В работе [17] исследованы термоиндуцированные структурные и магнитные переходы в системе $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ и построена предварительная фазовая диаграмма этой системы. Также показано, что соотношение железа и марганца является определяющим фактором при формировании магнитного упорядочения в данной системе твердых растворов в широком интервале температур. В связи с этим отдельный интерес представляют электронные и магнитные свойства твердого раствора $BiFeO_3$-$BiMnO_3$ с равными концентрациями железа и марганца – ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$. Твердый раствор $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ является наиболее репрезентативным составом системы $BiFeO_3$-$BiMnO_3$, так как характеризуется равным содержанием ионов железа и марганца, обусловливающих его магнитные свойства, а также ионов висмута, ответственных за формирование дипольного электрического момента. Таким образом, твердый раствор $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ соответствует оптимальному химическому составу системы твердых растворов $BiFeO_3$-$BiMnO_3$, относящихся к классу магнитоэлектриков. На сегодняшний день в научной литературе отсутствует информация о систематическом исследовании ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$. Так, практически нет данных о магнитных моментах для ионов железа и марганца, мало сведений о характере локализации их 3*d*-состояний и ширине энергетической щели для ферроманганитов с различной спиновой ориентацией ионов переходных металлов.

Цель настоящей работы – исследование электронной структуры и анализ орбитальных заселенностей ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ путем моделирования с использованием квантово-механических методов (методов из первых принципов).

Эксперимент. Ферроманганит висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ характеризуется орторомбической структурой, при этом элементарная ячейка состоит из 80 ионов [17, 18], что значительно затрудняет количественное исследование его свойств путем квантово-механического моделирования. Одним из возможных решений данной проблемы может быть использование так называемых модельных систем – полиморфных фаз исследуемого соединения, содержащих меньшее количество ионов в элементарной ячейке. В рассматриваемом случае в качестве модельной системы может выступить ромбоэдрическая структура ферроманганита висмута $BiFe_xMn_{1-x}O_3$, в которой элементарная ячейка включает в себя только 10 ионов. Количественные оценки, полученные для такой структуры, могут быть качественно перенесены на случай орторомбической фазы. Близость ионных радиусов Fe^{3+} и Mn^{3+} позволяет рассматривать соединение $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ не только изоморфным $BiFeO_3$, но и изоструктурным ему, поэтому для моделирования элементарная ячейка строилась из экспериментальных данных для $BiFeO_3$ с замещением одного иона железа ионом марганца [17]. Однако в таком случае формируются магнитные подрешетки железа и марганца с противоположным направлением спиновых магнитных моментов, при этом каждая из подрешеток характеризуется ферромагнитным упорядочением, тогда как в исходном $BiFeO_3$ подрешетка ионов железа имеет антиферромагнитное упорядочение.

С кристаллохимической точки зрения следует построить сверхъячейку, в которой магнитные подрешетки железа и марганца будут иметь антиферромагнитное упорядочение. Минимальной сверхъячейкой, удовлетворяющей этому условию, является удвоенная элементарная ячейка. Поэтому с целью корректного описания системы в рамках математической модели построили сверхъячейку размером 2×1×1, для которой проводили самосогласованный расчет и последующий анализ свойств. Параметры решетки и позиции ионов в ней выбирали в соответствии с экспериментальными данными для $BiFeO_3$, так как проведение структурной оптимизации (релаксации) исследуемой системы может вносить дополнительную неопределенность при распространении результатов исследования ромбоэдрической структуры на орторомбическую. Влияние замещения железа марганцем на структурные параметры не учитывали вследствие его ожидаемой незначительности.

Численное моделирование осуществляли в рамках теории функционала плотности и псевдопотенциала, реализованных в пакете OpenMX [19–21]. Критерий сходимости расчета самосогласованного поля составлял 10^{-9} эВ/ион. Интегрирование в первой зоне Бриллюэна проводили по Г-центрированной регулярной сетке *k*-точек размером 3×5×5. Сетку для численного интегрирования выбирали такой, чтобы среднее значение энергии обрезания составляло 80 хартри. Псевдопотенциалы включали в себя в качестве валентных 5*d*-, 6*s*- и 6*p*-электроны для висмута, 3*p*-, 3*d*- и 4*s*-электроны для железа, 3*s*-, 3*p*-, 3*d*- и 4*s*-электроны для марганца, а также 2*s*- и 2*p*-электроны для кислорода. Численное моделирование проводили в рамках обобщенного градиентного приближения и обменно-корреляционного функционала *PBE*, предложенного в работе [22]. Для более точного учета кулоновской корреляции *d*-электронов железа и марганца использовали поправку Хаббарда U = 5,8 эВ для железа и U = 5,2 эВ для марганца в упрощенном вращательно-инвариантном виде, что соответствует литературным данным [23–25]. Плотность электронных состояний рассчитывали с помощью метода тетраэдров по Г-центрированной регулярной сетке *k*-точек размером 3×6×6. Анализ заселенностей проводили по Малликену и Вороному.

Результаты и их обсуждение. Модельная структура ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ представлена на рис. 1. Магнитные моменты ионов железа и марганца антипараллельны для антиферромагнитного упорядочения. Параметры решетки сверхъячейки составляют: a = 10,992 Å, $b = c$ = 5,496 Å, межосевые углы равны и составляют 62,01°. Моделирование показало, что в исследуемой системе имеется небольшой магнитный момент (~ 0,024 $\mu_Б$ на сверхъячейку), что более чем на порядок превышает погрешность расчетов. Фактически полученное значение магнитного момента можно интерпретировать как слабый ферромагнетизм, который является следствием структурного строения сверхъячейки ромбоэдрического $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$. Для построенной конфигурации замещение ионов железа ионами марганца при переходе от $BiFeO_3$ к $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ приводит к нарушению исходной симметрии элементарной ячейки $BiFeO_3$ и несохранению равенства чисел состояний со спином вверх и вниз.

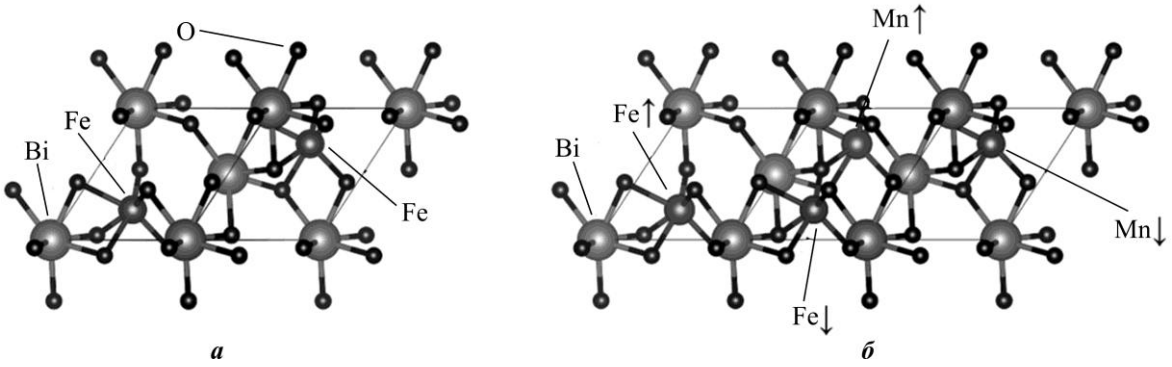


Рис. 1. Визуализация используемых модельных структур: *а* – элементарная ячейка $BiFeO_3$ с ромбоэдрическими осями; *б* – сверхъячейка $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ размером 2×1×1 (стрелки – направление магнитного момента)

Fig. 1. Visualization of the used structural models: *a* – the unit cell of $BiFeO_3$ with rhombohedral axes; *b* – the $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ supercell with a metric 2×1×1 (the arrows – the direction of the magnetic moments)

Следует отметить, что слабый ферромагнетизм влияет и на плотность электронных состояний, в результате чего возникает некоторая несимметричность (рис. 2). Ширина энергетической щели составляет 1,28 и 1,48 эВ для состояний со спином вниз и спином вверх соответственно. Валентная зона преимущественно сформирована O2*p*-состояниями с небольшой примесью остальных ионов. При этом тип межзонных переходов для обоих спиновых каналов, вероятно, непрямозонный. Для уточнения этого требуется проведение дальнейших расчетов дисперсии электронных зон вдоль особых точек высокой симметрии первой зоны Бриллюэна, что не является целью данной работы.

Вблизи потолка валентной зоны для состояний со спином вниз наблюдается узкая полоса (0,2–0,3 эВ), сформированная вкладом ионов кислорода и марганца, что говорит о связи магнитного момента ионов марганца и близлежащих ионов кислорода. Зона проводимости образована 3*d*-состояниями ионов железа с небольшой примесью 3*d*-состояний ионов марганца, локализующихся в виде трех узких полос шириной 0,2–0,4 эВ вблизи дна зоны, что согласуется с результатами, полученными для $BiFeO_3$ [23]. С увеличением энергии наблюдаются асимметричные протяженные полосы 3*d*-состояний ионов марганца практически без примеси железа 3*d*-состояний, что свидетельствует о проявлении орбитального порядка, присущего $BiMnO_3$. Однако вследствие большого расстояния между ионами марганца (6,63 Å) косвенного механизма недостаточно для выстраивания дальнего порядка, приводящего к ферромагнитному

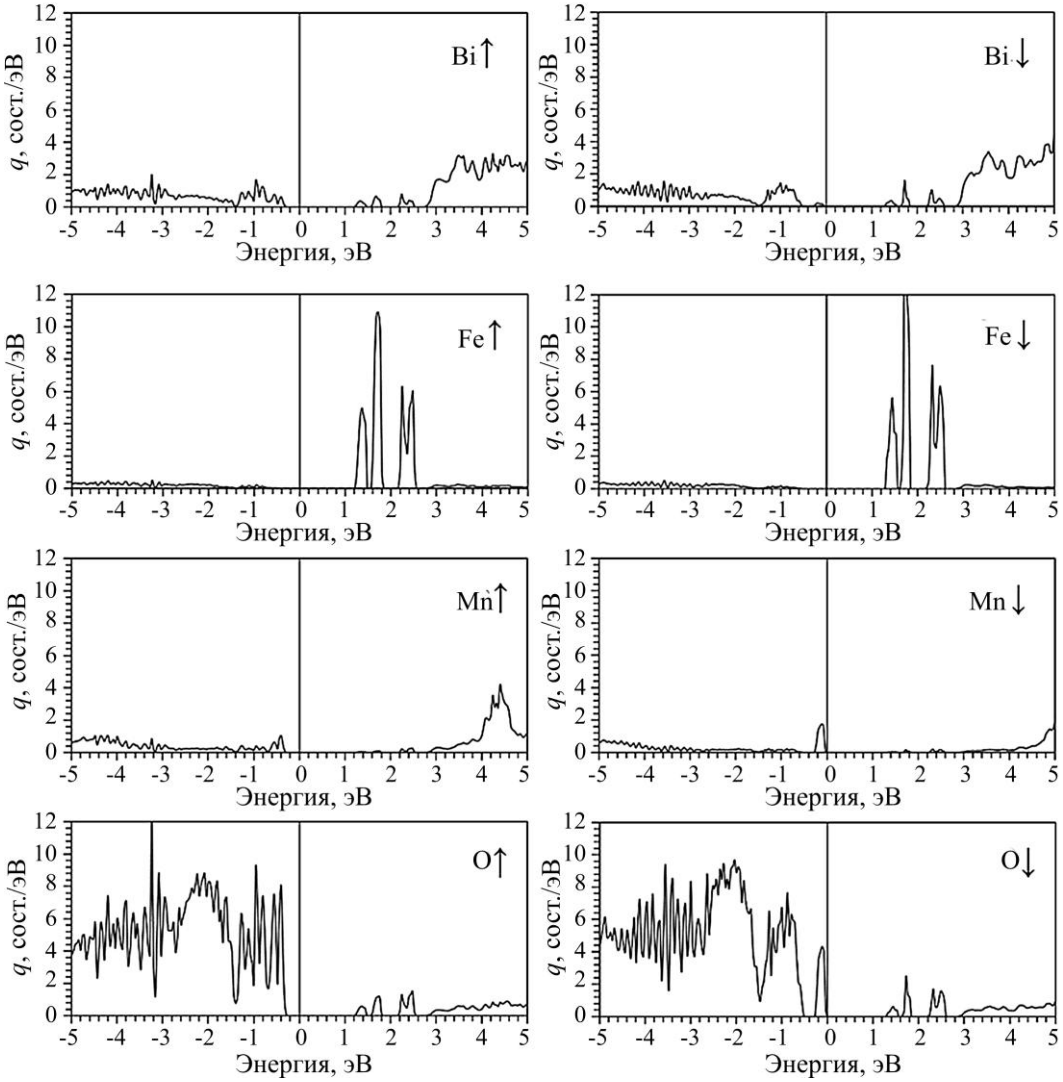


Рис. 2. Атомно-проецированная спин-разрешенная плотность электронных состояний *q* в $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ (за ноль принят потолок валентной зоны для состояний со спином вниз)
Fig. 2. Atomically projected spin-allowed density of electronic states *q* in $BiFe_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ (zero level is the top of the valence band for spin-downstates)

упорядочению, как в $BiMnO_3$. Наблюдается лишь взаимодействие между *d*-орбиталями марганца и *p*-орбиталями кислорода, что приводит к поляризации последних и ненулевому магнитному моменту.

Анализ заселенностей орбиталей позволяет не только исследовать особенности электронного строения атома при переходе из свободного состояния в химически связанное, но и определить значение атомного магнитного момента. Наиболее распространен анализ заселенностей по Малликену, главная идея которого заключается в таком разложении электронной плотности, при котором заселенность перекрывания делится поровну между близлежащими атомами. Отметим, что заселенность перекрывания неэквивалентна интегралу перекрывания, хотя и включает в себя последний. Разница сумм заселенностей всех псевдоатомных орбиталей с различной спиновой ориентацией дает магнитный момент атома. Так как данный метод разработан для анализа электронной структуры финитных систем, полученные количественные результаты в случае пе-

риодических систем, особенно включающих магнитные ионы, следует воспринимать с учетом возможных неточностей приближения. В качестве дополнительного средства можно использовать анализ заселенностей по Вороному, при котором применяется интегрирование электронной плотности по полиэдрам Вороного (Вороного – Дирихле), которые заполняют кристаллическое пространство. При этом возникающая при использовании подхода Малликена проблема влияния полноты базиса на заселенность снимается, поскольку интегрирование проводится по электронной плотности в рамках полиэдра, объем которого (объем Вороного) зависит от расстояния между атомами и не зависит от наличия трансляционной симметрии. Результаты анализа заселенностей в рамках обоих методов приведены в таблице.

Анализ средних значений заселенностей и магнитных моментов ионов по Малликену и Вороному
Analysis of mean values of the average populations and magnetic moments of the ions calculated assuming the models of Mulliken and Voronoi

Ион	Среднее значение эффективного заряда		Атомный магнитный момент $\mu_Б$	
	по Малликену	по Вороному	по Малликену	по Вороному
Bi	+0,18	+2,40	0,023	0,012
Fe	+1,26	+1,68	4,650	4,160
Mn	+1,31	+1,56	5,250	4,230
O	–0,66	–1,34	0,112	0,086

Значения эффективного заряда магнитных ионов близки для обоих методов, в то же время для ионов висмута и кислорода недооценен, хотя знак определен верно. Анализ заселенностей по Вороному восстанавливает эффективные заряды висмута и кислорода, незначительно изменяя эффективные заряды магнитных ионов. Совмещенный анализ заселенностей показывает, что в образовании химической связи принимают участие преимущественно висмут и кислород, железо и марганец при этом формируют магнитный порядок. Атомные магнитные моменты для висмута незначительны для обоих методов, тогда как в случае кислорода они возрастают примерно на порядок. В то же время по Малликену атомный магнитный момент марганца на 0,6 $\mu_Б$ больше, чем у железа, что объясняется бóльшим значением интеграла перекрывания из-за ориентации *d*-орбиталей ионов марганца в направлении атомов кислорода. В случае железа этого не происходит, что подтверждается значениями атомных магнитных моментов при анализе по Вороному, где разница между магнитными моментами между марганцем и железом уменьшается на порядок. Это говорит о том, что в первой координационной сфере марганца присутствует орбитальный порядок, как в случае $BiMnO_3$, однако вследствие большого расстояния между ионами марганца его не хватает для формирования ферромагнитного упорядочения в $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ из-за конкурирующего магнитного порядка, формируемого ионами железа.

Заключение. Методы из первых принципов позволяют исследовать электронную структуру и магнитные свойства ромбоэдрического ферроманганита висмута $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$, представляющего собой твердый раствор замещения в системе $BiFeO_3$-$BiMnO_3$. Данная структура является модельной для орторомбического твердого раствора $BiFe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ и позволяет распространить на него полученные результаты при значительно меньших вычислительных затратах.

Исследования показали, что анализ заселенностей по Малликену менее применим как для оценки эффективных зарядов ионов, так и для оценки их атомных магнитных моментов, что связано с особенностями строения исследуемого соединения и присутст-

вием орбитально-поляризованных ионов с различной заполненностью *d*-орбиталей. Для более точной оценки значений указанных характеристик рекомендуется применять анализ заселенностей по Вороному, показывающий, что магнитные моменты ионов железа и марганца близки (4,16 и 4,23 $\mu_Б$ соответственно), что и следует ожидать для антиферромагнитного упорядочения. Анализ заселенности электронных состояний показал, что 3*d*-состояния ионов железа локализованы, а 3*d*-состояния ионов Mn делокализованы и асимметричны. Обнаруженный малый результирующий магнитный момент элементарной ячейки (0,024 $\mu_Б$ на сверхъячейку) обусловлен неэквивалентностью позиций ионов железа и марганца, что приводит к формированию энергетической щели шириной 1,28 и 1,48 эВ для каналов со спином вниз и вверх соответственно.

Полученные результаты дают возможность определять факторы, обусловливающие тип структурных искажений, характер обменных взаимодействий между ионами железа и марганца и их магнитные моменты. Это существенно расширяет имеющиеся знания о структуре и свойствах магнитоэлектрических составов $BiFeO_3$-$BiMnO_3$.

Литература

1. ***Ederer C., Spaldin N. A.*** Weak ferromagnetism and magnetoelectric coupling in bismuth ferrite // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. Iss. 6. Art. No. 060401. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.060401

2. ***Belik A. A.*** Polar and nonpolar phases of $BiMO_3$: A review // Journal of Solid State Chemistry. 2012. Vol. 195. P. 32–40. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.01.025

3. ***Arnold D. C.*** Composition-driven structural phase transitions in rare-earth-doped $BiFeO_3$ ceramics: A review // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2015. Vol. 62. No. 1. P. 62–82. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.006668

4. ***Spaldin N. A., Ramesh R.*** Advances in magnetoelectric multiferroics // Nature Mater. 2019. Vol. 18. P. 203–212. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0275-2

5. ***Catalan G., Scott J. F.*** Physics and applications of bismuth ferrite // Adv. Mater. 2009. Vol. 21. Iss. 24. P. 2463–2485. https://doi.org/10.1002/adma.200802849

6. ***Fiebig M., Lottermoser T., Meier D., Trassin M.*** The evolution of multiferroics // Nat. Rev. Mater. 2016. Vol. 1. Art. No. 16046. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.46

7. ***Picozzi S., Ederer C.*** First principles studies of multiferroic materials // J. Phys.: Condens. Matter. 2009. Vol. 21. No. 30. Art. ID: 303201. https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/30/303201

8. Multiferroic perovskite bismuth ferrite nanostructures: A review on synthesis and applications / ***S. Kharbanda, N. Dhanda, A.-C. Aidan Sun et al.*** // J. Magn. Magn. Mater. 2023. Vol. 572. Art. ID: 170569. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170569

9. Crystal structure and spiral magnetic ordering of $BiFeO_3$ doped with manganese / ***I. Sosnowska, W. Schäfer, W. Kockelmann et al.*** // Appl. Phys. A. 2002. Vol. 74 (1). P. s1040–s1042. https://doi.org/10.1007/s003390201604

10. Electric field switching of the magnetic anisotropy of a ferromagnetic layer exchange coupled to the multiferroic compound $BiFeO_3$ / ***D. Lebeugle, A. Mougin, M. Viret et al.*** // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 103. Iss. 25. Art. ID: 257601. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.257601

11. Temperature and composition-induced structural transitions in $Bi_{1-x}La(Pr)_xFeO_3$ ceramics / ***D. V. Karpinsky, I. O. Troyanchuk, M. Tovar et al.*** // J. Am. Ceram. Soc. 2014. Vol. 97. Iss. 8. P. 2631–2638. https://doi.org/10.1111/jace.12978

12. ***Khomchenko V. A., Ivanov M. S., Karpinsky D. V., Paixão J. A.*** Composition-driven magnetic and structural phase transitions in $Bi_{1-x}Pr_xFe_{1-x}Mn_xO_3$ multiferroics // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 122. Iss. 12. Art. No. 124103. https://doi.org/10.1063/1.4993152

13. Magnetoelectric coupling of domains, domain walls and vortices in a multiferroic with independent magnetic and electric order / ***M. Giraldo, Q. N. Meier, A. Bortis et al.*** // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. Art. No. 3093. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22587-1

14. ***Belik A. A.*** Local distortions in multiferroic $BiMnO_3$ as a function of doping // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. Vol. 12. No. 4. Art. No. 044610. https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/4/044610

15. Orbital ordering as the determinant for ferromagnetism in biferroic $BiMnO_3$ / ***A. Moreira dos Santos, A. K. Cheetham, T. Atou et al.*** // Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys. 2002. Vol. 66. Iss. 6. Art. No. 064425. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.064425

16. Crystal and magnetic structure transitions in $BiMnO_{3+\delta}$ ceramics driven by cation vacancies and temperature / ***D. V. Karpinsky, M. V. Silibin, D. V. Zhaludkevich et al.*** // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 19. Art. No. 5805. https://doi.org/10.3390/ma14195805

17. Structural and magnetic phase transitions in $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ solid solution driven by temperature / ***D. V. Karpinsky, M. V. Silibin, S. I. Latushka et al.*** // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. Iss. 9. Art. No. 1565. https://doi.org/10.3390/nano12091565

18. Magnetic and structural properties of $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ / ***M. Azuma, H. Kanda, A. A. Belik et al.*** // J. Magn. Magn. 2007. Vol. 310. Iss. 2 (2). P. 1177–1179. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.10.287

19. ***Ozaki T.*** Variationally optimized atomic orbitals for large-scale electronic structures // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 67. Iss. 15. Art. No. 155108. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.155108

20. ***Ozaki T., Kino H.*** Numerical atomic basis orbitals from H to Kr // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 69. Iss. 19. Art. No. 195113. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.195113

21. ***Ozaki T., Kino H.*** Efficient projector expansion for the *ab initio* LCAO method // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72. Iss. 4. Art. No. 045121. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.045121

22. ***Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M.*** Generalized gradient approximation made simple // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. Iss. 18. P. 3865–3868. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865

23. ***Anisimov V. I., Aryasetiawan F., Lichtenstein A. I.*** First-principles calculations of the electronic structure and spectra of strongly correlated systems: The LDA+ *U* method // J. Phys.: Condens. Matter. 1997. Vol. 9. No. 4. Art. ID: 767. https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/4/002

24. Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+ *U* study / ***S. L. Dudarev, G. A. Botton, S. Y. Savrasov et al.*** // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. Iss. 3. P. 1505–1509. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.1505

25. First-principles study on the electronic and optical properties of $BiFeO_3$ / ***H. Wang, Y. Zheng, M.-Q. Cai et al.*** // Solid State Commun. 2009. Vol. 149. Iss. 15-16. P. 641–644. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2009.01.023

Статья поступила в редакцию 31.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 24.08.2023 г.; принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Баглов Алексей Викторович – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории энергоэффективных материалов и технологий Белорусского государственного университета (Беларусь, 220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4), научный сотрудник Центра «Наноэлектроника и новые материалы» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6), baglov@bsu.by

Хорошко Людмила Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории энергоэффективных материалов и технологий Белорусского государственного университета, (Беларусь, 220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4), доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6), khoroshko@bsu.by

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

Карпинский Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией оксидных материалов Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (Беларусь, 220072, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 19), старший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dmitry.karpinsky@gmail.com

References

1. Ederer C., Spaldin N. A. Weak ferromagnetism and magnetoelectric coupling in bismuth ferrite. *Phys. Rev. B*, 2005, vol. 71, iss. 6, art. no. 060401. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.060401

2. Belik A. A. Polar and nonpolar phases of $BiMO_3$: A review. *Journal of Solid State Chemistry*, 2012, vol. 195, pp. 32–40. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.01.025

3. Arnold D. C. Composition-driven structural phase transitions in rare-earth-doped $BiFeO_3$ ceramics: A review. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2015, vol. 62, no. 1, pp. 62–82. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.006668

4. Spaldin N. A., Ramesh R. Advances in magnetoelectric multiferroics. *Nature Mater.*, 2019, vol. 18, pp. 203–212. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0275-2

5. Catalan G., Scott J. F. Physics and applications of bismuth ferrite. *Adv. Mater.*, 2009, vol. 21, iss. 24, pp. 2463–2485. https://doi.org/10.1002/adma.200802849

6. Fiebig M., Lottermoser T., Meier D., Trassin M. The evolution of multiferroics. *Nat. Rev. Mater.*, 2016, vol. 1, art. no. 16046. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.46

7. Picozzi S., Ederer C. First principles studies of multiferroic materials. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2009, vol. 21, no. 30, art. ID: 303201. https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/30/303201

8. Kharbanda S., Dhanda N., Aidan Sun A.-C., Thakur A., Thakur P. Multiferroic perovskite bismuth ferrite nanostructures: A review on synthesis and applications. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2023, vol. 572, art. ID: 170569. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170569

9. Sosnowska I., Schäfer W., Kockelmann W., Andersen K. H., Troyanchuk I. O. Crystal structure and spiral magnetic ordering of $BiFeO_3$ doped with manganese. *Appl. Phys. A*, 2002, vol. 74 (1), pp. s1040–s1042. https://doi.org/10.1007/s003390201604

10. Lebeugle D., Mougin A., Viret M., Colson D., Ranno L. Electric field switching of the magnetic anisotropy of a ferromagnetic layer exchange coupled to the multiferroic compound $BiFeO_3$. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, vol. 103, iss. 25, art. ID: 257601. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.257601

11. Karpinsky D. V., Troyanchuk I. O., Tovar M., Sikolenko V., Efimov V., Efimova E., Shur V. Ya., Kholkin A. L. Temperature and composition-induced structural transitions in $Bi_{1-x}La(Pr)_xFeO_3$ ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2014, vol. 97, iss. 8, pp. 2631–2638. https://doi.org/10.1111/jace.12978

12. Khomchenko V. A., Ivanov M. S., Karpinsky D. V., Paixão J. A. Composition-driven magnetic and structural phase transitions in $Bi_{1-x}Pr_xFe_{1-x}Mn_xO_3$ multiferroics. *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 122, iss. 12, art. no. 124103. https://doi.org/10.1063/1.4993152

13. Giraldo M., Meier Q. N., Bortis A., Nowak D., Spaldin N. A., Fiebig M., Weber M. C., Lottermoser T. Magnetoelectric coupling of domains, domain walls and vortices in a multiferroic with independent magnetic and electric order. *Nat. Commun.*, 2021, vol. 12, art. no. 3093. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22587-1

14. Belik A. A. Local distortions in multiferroic $BiMnO_3$ as a function of doping. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2011, vol. 12, no. 4, art. no. 044610. https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/4/044610

15. Moreira dos Santos A., Cheetham A. K., Atou T., Syono Y., Yamaguchi Y., Ohoyama K., Chiba H., Rao C. N. R. Orbital ordering as the determinant for ferromagnetism in biferroic $BiMnO_3$. *Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys.*, 2002, vol. 66, iss. 6, art. no. 064425. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.064425

16. Karpinsky D. V., Silibin M. V., Zhaludkevich D. V., Latushka S. I., Sikolenko V. V., Többens D. M., Sheptyakov D., Khomchenko V. A., Belik A. A. Crystal and magnetic structure transitions in $BiMnO_{3+\delta}$ ceramics driven by cation vacancies and temperature. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 19, art. no. 5805. https://doi.org/10.3390/ma14195805

17. Karpinsky D. V., Silibin M. V., Latushka S. I., Zhaludkevich D. V., Sikolenko V. V., Al-Ghamdi H., Almuqrin A. H., Sayyed M. I., Belik A. A. Structural and magnetic phase transitions in $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ solid solution driven by temperature. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 9, art. no. 1565. https://doi.org/10.3390/nano12091565

18. Azuma M., Kanda H., Belik A. A., Shimakawa Y., Takano M. Magnetic and structural properties of $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$. *J. Magn. Magn.*, 2007, vol. 310, iss. 2 (2), pp. 1177–1179. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.10.287

19. Ozaki T. Variationally optimized atomic orbitals for large-scale electronic structures. *Phys. Rev. B.*, 2003, vol. 67, iss. 15, art. no. 155108. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.155108

20. Ozaki T., Kino H. Numerical atomic basis orbitals from H to Kr. *Phys. Rev. B*, 2004, vol. 69, iss. 19, art. no. 195113. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.195113

21. Ozaki T., Kino H. Efficient projector expansion for the *ab initio* LCAO method. *Phys. Rev. B*, 2005, vol. 72, iss. 4, art. no. 045121. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.045121

22. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 77, iss. 18, pp. 3865–3868. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865

23. Anisimov V. I., Aryasetiawan F., Lichtenstein A. I. First-principles calculations of the electronic structure and spectra of strongly correlated systems: The LDA+ *U* method. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1997, vol. 9, no. 4, art. ID: 767. https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/4/002

24. Dudarev S. L., Botton G. A., Savrasov S. Y., Humphreys C. J., Sutton A. P. Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+ *U* study. *Phys. Rev. B*, 1998, vol. 57, iss. 3, pp. 1505–1509. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.1505

25. Wang H., Zheng Y., Cai M.-Q., Huang H., Chan H. L. W. First-principles study on the electronic and optical properties of $BiFeO_3$. *Solid State Commun.*, 2009, vol. 149, iss. 15-16, pp. 641–644. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2009.01.023

The article was submitted 31.07.2023; approved after reviewing 24.08.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Aleksey V. Baglov – Senior Researcher of the Laboratory of Energy Efficient Materials and Technologies, Belarusian State University (Belarus, 220030, Minsk, Nezavisimosti ave., 4), Researcher of the Center "Nanoelectronics and New Materials", Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, Petrus Brovka st., 6), baglov@bsu.by

Lyudmila S. Khoroshko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Lead Researcher of the Laboratory of Energy Efficient Materials and Technologies, Belarusian State University (Belarus, 220030, Minsk, Nezavisimosti ave., 4), Assoc. Prof. of the Micro- and nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, Petrus Brovka st., 6), khoroshko@bsu.by

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

Dmitry V. Karpinsky – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Oxide Materials, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (Belarus, 220072, Minsk, Petrus Brovka st., 19), Senior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dmitry.karpinsky@gmail.com

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

С тематическими указателями статей за 1996 – 2023 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 537.534.35
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-30-41
EDN: TAGNVJ

Сравнение процессов распыления кремния и диоксида кремния фокусированным ионным пучком

А. В. Румянцев, Н. И. Боргардт

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

lemi@miee.ru

Аннотация. Метод фокусированного ионного пучка применяется при модификации поверхности и создании структур на подложках практически из любых материалов. Важность кремния и диоксида кремния для современных нанотехнологий инициирует проведение сравнительного анализа процессов их распыления методом фокусированного ионного пучка в одинаковых экспериментальных условиях. В работе проведено сравнение процессов распыления монокристаллического кремния и термического диоксида кремния. Методами растровой электронной микроскопии исследованы поперечные сечения сформированных двух типов углублений, имеющих низкое и высокое аспектное отношение. Установлено, что в обоих материалах углубления как первого, так и второго типа имеют практически одинаковую форму, несмотря на существенные различия в физических свойствах кремния и диоксида кремния. Моделирование формирования структур проведено методом функций уровня с использованием известных экспериментальных зависимостей коэффициентов распыления. Для учета распыления отраженными ионами методом Монте-Карло рассчитаны их распределения по углам и энергиям. Данные зависимости, а также установленные на их основе скорости распыления кремния и диоксида кремния отраженными ионами имеют практически идентичный вид, что свидетельствует о схожих механизмах распыления этих материалов. Наложение расчетных профилей сформированных углублений на экспериментальные микрофотографии их поперечных сечений позволило установить, что моделирование адекватно описывает форму получаемых структур с низким аспектным отношением для обоих материалов. Для структур с высоким аспектным отношением удовлетворительное согласие результатов моделирования с экспериментальными данными установлено для образца из монокристаллического кремния, для углублений в диоксиде кремния расхождение в глубине расчетного и экспериментального профилей составило около 10 %.

Ключевые слова: фокусированный ионный пучок, распыление, метод функций уровня, метод Монте-Карло, кремний, диоксид кремния

© А. В. Румянцев, Н. И. Боргардт, 2024

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (Соглашение № 23-19-00649) с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов».

Для цитирования: Румянцев А. В., Боргардт Н. И. Сравнение процессов распыления кремния и диоксида кремния фокусированным ионным пучком // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 30–41. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-30-41. – EDN: TAGNVJ.

Original article

Comparison of silicon and silicon dioxide sputtering by a focused ion beam

A. V. Rumyantsev, N. I. Borgardt

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

lemi@miee.ru

Abstract. The focused ion beam technique is used to modify the surface and fabricate structures on substrates of almost any material. The significance of silicon Si and silicon dioxide SiO_2 for modern nanotechnologies calls for comparative analysis of their sputtering by focused ion beam under the same experimental conditions. In this work, a comparison of sputtering processes of monocrystalline silicon and thermal silicon dioxide is made. Two types of rectangular boxes were formed, having a low and a high aspect ratio, and their cross sections were studied by scanning electron microscopy. It has been established that in both materials the rectangular boxes of the first and second types had almost the same shape despite significant differences in the physical properties of Si and SiO_2. Modeling of the formation of structures was carried out by the level set method using the known experimental dependencies of the sputtering yield. To consider sputtering by reflected ions, the Monte Carlo method was used to calculate their angular and energy distributions. These dependencies, as well as the sputtering rates of Si and SiO_2 by reflected ions established on their basis, had almost identical shape indicating similar sputtering mechanisms of these materials. The superimposition of the calculated profiles of the formed rectangular boxes on the experimental micrographs of their cross sections has made it possible to establish that the simulation adequately describes the shape of the obtained structures with a low aspect ratio for both materials. For structures with a high aspect ratio, a satisfactory agreement between the simulation results and experimental data has been established for a sample of single-crystal silicon, and for rectangular boxes in silicon dioxide the discrepancy in the depth of the calculated and experimental profiles is about 10 %.

Keywords: focused ion beam, sputtering, level set method, Monte Carlo simulation, silicon, silicon dioxide

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (Agreement no. 23-19-00649) using the shared equipment of the Collective-Use Center “Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects”.

For citation: Rumyantsev A. V., Borgardt N. I. Comparison of silicon and silicon dioxide sputtering by a focused ion beam. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 30–41. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2024-29-1-30-41. – EDN: TAGNVJ.

Введение. Использование микро- и наноструктур в современных технологиях обусловливает развитие новых подходов для их изготовления, в том числе с применением ионно-пучковых методов [1]. Одним из универсальных и широко распространенных инструментов прецизионного формирования микро- и наноструктур является метод фокусированного ионного пучка (ФИП) [2]. Его применение позволяет контролируемо и с высокой воспроизводимостью создавать структуры для оптических приложений [3], устройств плазмоники [4], микроинструментов для механической обработки поверхности [5]. Кроме того, метод ФИП традиционно используется для приготовления образцов для просвечивающей электронной микроскопии [6] и модификации интегральных микросхем [7].

В основе метода ФИП – распыление (удаление) атомов образца, за счет которого происходит травление его поверхности. Физический характер воздействия пучка на подложку приводит к меньшей селективности такого травления, чем в химических процессах. Известно, что закономерности процесса распыления могут существенно зависеть от типа облучаемой подложки. Так, в работе [8] показано, что монокристаллический кремний и карбид кремния имеют различные угловые зависимости коэффициента распыления. Сравнение воздействия ФИП на монокристаллические медь и кремний проведено в работе [9]. Отмечено существенное влияние эффекта каналирования на закономерности распыления материала. Особый интерес представляет распыление кремния и диоксида кремния ввиду их важности для многих технологических приложений, в том числе микроэлектроники. Экспериментальное изучение распыления кремния проведено, например, в работе [10], диоксида кремния – в работе [11].

Успешное применение метода ФИП связано с учетом особенностей распыления обрабатываемого материала при предсказании формы получаемых структур. Наиболее эффективно данная задача может быть решена с помощью компьютерного моделирования. Для описания эволюции поверхности структур с высоким аспектным отношением, как правило, используются метод движения сегментов поверхности [12], метод ячеек [13] либо метод функций уровня [11, 14, 15]. Для моделирования таких структур необходимы данные об угловой зависимости коэффициента распыления материала, о пространственном распределении распыленных атомов [12], а также о распылении отраженными ионами [16] и скорости вторичного распыления переосажденного материала [17]. Такие данные могут быть получены либо на основе экспериментальных исследований, либо с помощью атомистического моделирования методами Монте-Карло [18] и молекулярной динамики [19]. Для монокристаллического кремния результаты компьютерного моделирования эволюции рельефа поверхности проведены в работах [12, 14, 15], для диоксида кремния – в [11, 13], для их многослойных композиций – в [20].

В настоящей работе поперечные сечения углублений с низким и высоким аспектным отношением, сформированные с применением метода ФИП в кремнии и диоксиде кремния, визуализируются с применением растровой электронной микроскопии (РЭМ). Сравнение процессов распыления монокристаллического кремния и диоксида кремния методом ФИП в одинаковых экспериментальных условиях, а также результатов моделирования выполняется методом функций уровня с учетом эффектов отражения ионов и вторичного осаждения распыленного материала.

Экспериментальное изготовление и характеризация структур. Тестовые структуры прямоугольных углублений двух типов изготавливали в электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 650 (США) на подложках монокристаллического кремния и в слое термического диоксида кремния толщиной ~ 1,8 мкм при ускоряющем напряже-

нии ионов 30 кВ, токе пучка 900 пА. Шаг пучка в двух перпендикулярных направлениях равен 38,5 нм. Давление в камере микроскопа при проведении экспериментов не превышало 10^{-6} мбар.

Углубления первого типа создавали при одном проходе ионного пучка по шаблону ($M = 1$), время его остановки $t_d = 0{,}8$ мс, углубления второго типа – при $M = 3$, $t_d = 1{,}2$ мс. Сформированные структуры имели асимметричную форму, типичную при сканировании с малым числом проходов ионного пучка [12, 15]. На изготовленные углубления для защиты поверхности и улучшения контраста на изображениях осаждали слой платины и аморфного углерода (Pt + *a*-C), а затем с применением ФИП формировали их поперечные сечения.

Микрофотографии поперечных сечений (рис. 1, *а–г*, см. 4-ю с. обложки) получали методом РЭМ при токе пучка 50 пА и ускоряющем напряжении 5 кВ для кремния и 1 кВ для диоксида кремния для уменьшения влияния эффекта зарядки, приводящего к неравномерному контрасту на изображениях (рис. 1, *в*, *г*, см. 4-ю с. обложки). Из РЭМ-изображений поперечных сечений на рис. 1, *а*, *в* (см. 4-ю с. обложки) видно, что углубления первого типа имеют низкое аспектное отношение, а второго типа (рис. 1, *б*, *г*, см. 4-ю с. обложки) – достаточно высокое. РЭМ-изображения свидетельствуют о схожей форме сформированных в кремнии и диоксиде кремния углублений. Такое сходство объясняется тем, что данные материалы имеют близкие значения поверхностной энергии связи, для них характерны ковалентные связи между атомами, они либо аморфизуются при воздействии пучка (кремний), либо изначально являются аморфными (диоксид кремния).

Для углублений первого типа, изготовленных в кремнии при $M = 1$, слой переосажденного материала $Si^{(r)}$ значительно светлее (рис. 1, *а*, см. 4-ю с. обложки), чем химически чистый кремний. В случае диоксида кремния (рис. 1, *б*, см. 4-ю с. обложки) наличие переосажденного слоя $SiO_2^{(r)}$ устанавливается по характерной выпуклой форме левой боковой стенки углубления, однако интенсивности на изображениях данного материала и слоя диоксида кремния практически совпадают друг с другом. Для углублений второго типа, изготовленных в кремнии при $M = 3$, переосажденный материал становится более различим, по-видимому, из-за увеличения в нем концентрации атомов галлия. Можно отметить, что толщина слоя переосажденного материала на левой боковой стенке больше в случае кремния, а углубление в диоксиде кремния имеет несколько большую глубину. Наклон правой боковой стенки углубления в кремнии составляет приблизительно 86°, что превышает его значение, близкое к 83°, в случае диоксида кремния.

Для удобства сравнения формы углублений, сформированных в разных материалах, выполняли цифровую обработку полученных микрофотографий с использованием гауссовой фильтрации и процедуры обнаружения границ [21]. Найденные профили углублений, представленные на рис. 1, *д*, *е* (см. 4-ю с. обложки), свидетельствуют о том, что полученные структуры имеют приблизительно одинаковую форму, а общее количество распыленного ионным пучком материала для диоксида кремния лишь незначительно больше, чем для кремния.

Моделирование процесса распыления. Для описания эволюции поверхности образца под воздействием фокусированного ионного пучка использовали метод функций уровня с применением представленного в работе [11] подхода. В рамках этого метода функция $S(x, y, t)$, описывающая удаление z точки (x, y) распыляемой поверхности от

плоскости $x0y$ в момент времени t, определяется как нулевой уровень вспомогательной функции $\Phi(x,y,z,t)$, которая удовлетворяет дифференциальному уравнению [22]

$$\frac{\partial}{\partial t}\Phi(\vec{r},t)+V_N(\vec{r},t)\left|\nabla\Phi(\vec{r},t)\right|=0, \quad (1)$$

где $V_N(\vec{r},t)$ – скорость движения сегментов поверхности в нормальном к ним направлении при воздействии на образец падающими ионами.

При облучении подложки ФИП происходят распыление атомов материала образца и отражение части падающих ионов от его поверхности. Согласно работе [12] плотность потока распыленных атомов $F_{sp}(\vec{r},t)$ определяется выражением

$$F_{sp}(\vec{r}_1,t)=F_{ion}(\vec{r}_1,t)\cos(\theta)Y(\theta)(1+\mu), \quad (2)$$

где $F_{ion}(\vec{r}_1,t)$ – плотность потока падающих ионов галлия; θ – угол падения, который находится относительно нормали $\vec{n}_1$ к элементу поверхности dS_1 с центром в точке $\vec{r}_1$ в соответствии с рис. 2; $\mu=\left[Y_r(\theta)/Y(\theta)-1\right]$– параметр, который характеризует различие в скоростях распыления материала в переосажденном и исходном состояниях и значение которого определяется коэффициентами распыления $Y_r(\theta)$ и $Y(\theta)$ соответственно.

Для вычисления $F_{sp}(\vec{r},t)$ использовали экспериментальные угловые зависимости коэффициентов распыления $Y_{\mathrm{Si}}(\theta)$ [10] и $Y_{\mathrm{SiO_2}}(\theta)$ [11], а значения μ равны 0,3 для Si [17] и 0,15 для SiO_2 [11].

Плотность потока отраженных от элемента поверхности dS_1 ионов (атомов) галлия, которые достигают поверхности dS с центром в точке $\vec{r}$ (см. рис. 2), в соответствии с работой [16] имеет вид

$$dF_b(\vec{r},t)= \\ =\int\frac{F_{ion}(\vec{r}_1,t)\cos(\theta)\,f_\Omega(\vec{r}_1)\cos(\theta')}{(\vec{r}-\vec{r}_1)^2}dS_1, \quad (3)$$

где функция $f_\Omega(\vec{r}_1)=f_\Omega(\theta,\gamma,\varphi)$, зависящая от азимутального (φ) и полярного (γ) углов, описывает угловое распределение отраженных ионов.

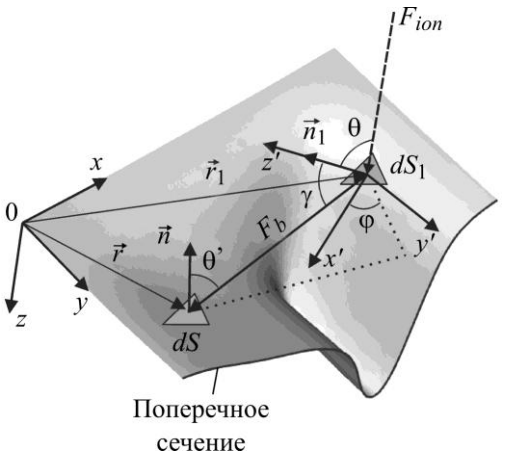


Рис. 2. Схематическое изображение процесса распыления подложки ($\vec{n}$, $\vec{n}_1$ – единичные векторы нормалей к элементам поверхности dS и dS_1)

Fig. 2. Schematic drawing of the substrate sputtering process ($\vec{n}$, $\vec{n}_1$ – unit normal vectors to surface elements dS and dS_1)

Воздействие отраженных ионов на элемент поверхности dS (см. рис. 2) вызывает еще один поток распыленных атомов, плотность которого $F_{sp}^b(\vec{r},t)$ описывалась как

$$F_{sp}^b(\vec{r},t)=\int\frac{F_{ion}(\vec{r}_1,t)\cos(\theta)\,f_\Omega(\vec{r}_1)\cos(\theta')Y^b(\theta')(1+\mu)}{(\vec{r}-\vec{r}_1)^2}dS_1, \quad (4)$$

где $Y^b(\theta')$ – угловая зависимость усредненного коэффициента распыления отраженными ионами, а интегрирование проводится по всей области взаимодействия пучка с образцом.

Бóльшая доля распыленных атомов не оказывает влияния на формирование рельефа, но часть из них достигает распыляемой поверхности и осаждается на ней. Плотность потока таких переосаждаемых атомов, распыленных первичным пучком, вычисляется по формуле

$$F_r(\vec{r},t)=\frac{1}{\pi}\int\frac{F_{sp}(\vec{r}_1,t)\cos(\gamma)\cos(\theta')}{(\vec{r}-\vec{r}_1)^2}dS_1. \quad (5)$$

Использование формулы (5) предполагает, что угловое распределение распыленных атомов подчиняется косинусоидальному закону, коэффициент прилипания переосаждаемых атомов равен единице [12], а интегрирование проводится по всей области поверхности образца, в которую попадают распыленные атомы. Формула, аналогичная (5), используется для расчета потока $F_r^b(\vec{r},t)$ переосаждаемых атомов, индуцированного отраженными ионами.

Скорость движения сегментов поверхности в направлении нормали определяется введенными плотностями потоков:

$$V_N(\vec{r},t)=\frac{F_{sp}(\vec{r},t)+F_{sp}^b(\vec{r},t)-F_r(\vec{r},t)-F_r^b(\vec{r},t)}{n}, \quad (6)$$

где n – атомная плотность распыляемого материала.

Плотность потока ионов в падающем пучке равна сумме двух гауссовых функций [23]:

$$F_{ion}(x,y)=\frac{I}{e}\frac{1}{2\pi(\sigma_1^2+w\sigma_2^2)}\left[\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}\right)+w\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_2^2}\right)\right], \quad (7)$$

где $\sigma_1=53$ нм; $\sigma_2=136$ нм; $w=0{,}08$ [11].

Численное решение уравнения (1) для определения $\Phi(\vec{r},t)$ выполняли на основной регулярной прямоугольной расчетной сетке, функцию $S(x,y,t)$ находили на основе $\Phi(\vec{r},t)$ на каждом временном шаге методом шагающих кубов на нерегулярной сетке треугольных элементов [24]. Скорости движения сегментов поверхности V_N, определяемые плотностями потоков распыленных, отраженных и переосажденных атомов, вычисляли на поверхности $S(x,y,t)$ и для решения (1) переносили на основную расчетную сетку с использованием интерполяции методом ближайшего соседа.

Моделирование ионной бомбардировки методом Монте-Карло. Для нахождения входящих в выражения (2)–(4) функций $Y(\theta)$, $f_\Omega(\vec{r}_1)$, $Y^b(\theta')$, а также для сравнения зависимостей, характеризующих взаимодействия ионного пучка с кремнием и диоксидом кремния, выполняли моделирование бомбардировки этих материалов ионами галлия с энергией 30 кэВ методом Монте-Карло. Вычисления проводили в приближении бинарных столкновений в программном пакете SDTrimSP 5.07 в статическом режиме и с использованием потенциала взаимодействия KrC [25]. Для получения угловых зависимостей коэффициентов распыления $Y_{Si}(\theta)$ и $Y_{SiO_2}(\theta)$ угол падения ионов изменяли с шагом 10°, количество ионов для каждого значения θ составляло 10^5.

На основе рассчитанных значений $Y_{\mathrm{Si}}(\theta)$ и $Y_{\mathrm{SiO_2}}(\theta)$ вычисляли скорости распыления кремния Q_{Si} и оксида кремния $Q_{\mathrm{SiO_2}}$, которые более удобны для сравнения друг с другом:

$$Q_{\mathrm{Si,\,SiO_2}} = \frac{Y_{\mathrm{Si,\,SiO_2}}}{n_{\mathrm{Si,\,SiO_2}} e}, \tag{8}$$

где $n_{\mathrm{Si}} = 5{,}0 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$ и $n_{\mathrm{SiO_2}} = 6{,}9 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$ – атомные плотности кремния и диоксида кремния соответственно; e – элементарный заряд.

На рис. 3 представлены зависимости $Q_{\mathrm{Si}}(\theta)$ и $Q_{\mathrm{SiO_2}}(\theta)$, полученные методом Монте-Карло и на основе экспериментальных данных, для кремния [10] и диоксида кремния [11]. Коэффициенты распыления рассматриваемых материалов заметно отличаются, а согласно рис. 3 скорости их распыления Q_{Si} и $Q_{\mathrm{SiO_2}}$ приблизительно одинаковые вследствие различий в плотностях кремния и диоксида кремния. Расчетные коэффициенты распыления материалов незначительно меньше соответствующих экспериментальных значений.

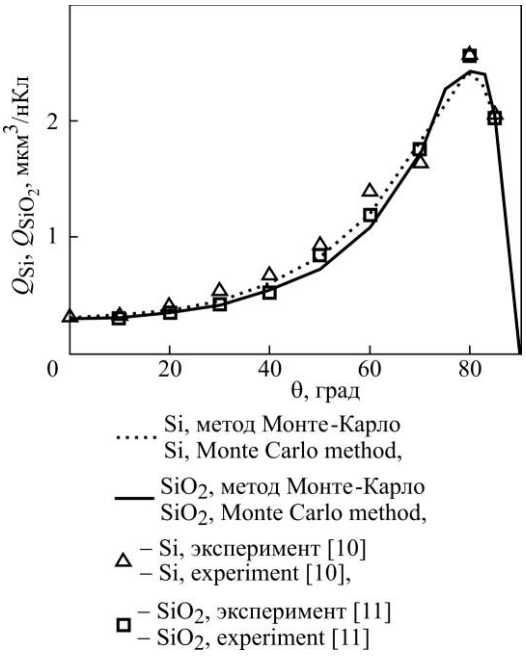


Рис. 3. Зависимости скоростей распыления от угла падения ионов Q_{Si}, вычисленные методом Монте-Карло и полученные на основе экспериментальных данных для кремния и диоксида кремния

Fig. 3. Sputtering rate angular dependencies calculated using Monte Carlo method and obtained on the basis of experimental data for silicon and for silicon dioxide

Поток ионов, отраженных от элемента поверхности dS_1, определяется коэффициентом отражения падающих под углом θ частиц $[R(\theta)]$ и нормированной функцией распределения отраженных ионов $f(\theta, \gamma, \varphi, E)$, зависящей от их энергии и углов γ и φ (см. рис. 2). При вычислении $R_{\mathrm{Si,\,SiO_2}}$ и $f_{\mathrm{Si,\,SiO_2}}$ для кремния и диоксида кремния методом Монте-Карло число рассчитываемых ионных траекторий для каждого значения угла θ составляло 10^7. На рис. 4, *а* представлены графики зависимостей коэффициентов отражения для кремния и диоксида кремния. В целом они близки друг к другу, однако при углах падения ионного пучка от 70 до 85° коэффициент отражения R_{Si} несколько больше, чем $R_{\mathrm{SiO_2}}$, а при $\theta > 85°$, наоборот, $R_{\mathrm{SiO_2}}$ превышает R_{Si}. Из рис. 4, *а* также следует, что при углах падения менее ≈ 70° отражением ионов от поверхности обоих материалов можно пренебречь.

При нахождении функций распределения $f_{\mathrm{Si,\,SiO_2}}$ предполагали, что они могут быть представлены в виде [11]

$$f_{\mathrm{Si,\,SiO_2}}(\theta, \gamma, \varphi, E) = f_{\Omega_{\mathrm{Si}}, \Omega_{\mathrm{SiO_2}}}(\theta, \gamma, \varphi)\, f_{E_{\mathrm{Si}}, E_{\mathrm{SiO_2}}}(\theta, E), \tag{9}$$

где $f_{\Omega_{\mathrm{Si}}, \Omega_{\mathrm{SiO_2}}}(\theta, \gamma, \varphi)$ и $f_{E_{\mathrm{Si}}, E_{\mathrm{SiO_2}}}(\theta, E)$ – функции распределения отраженных ионов по телесному углу и по энергии для кремния и диоксида кремния соответственно.

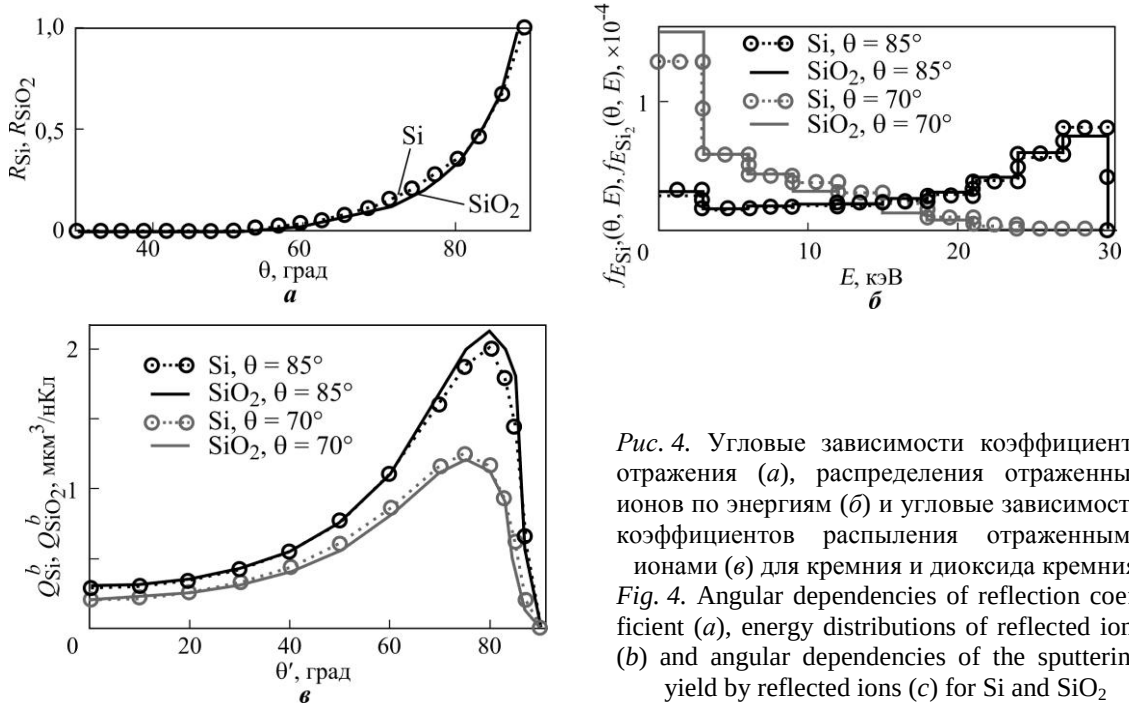


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициента отражения (*а*), распределения отраженных ионов по энергиям (*б*) и угловые зависимости коэффициентов распыления отраженными ионами (*в*) для кремния и диоксида кремния
Fig. 4. Angular dependencies of reflection coefficient (*a*), energy distributions of reflected ions (*b*) and angular dependencies of the sputtering yield by reflected ions (*c*) for Si and SiO_2

Для вычисления функций распределения отраженных ионов по телесному углу полусферу над поверхностью подложки разбивали на 30 × 120 элементарных телесных углов с шагом 3° для углов γ и φ. Значения функций $f_{\Omega_{Si},\Omega_{SiO_2}}(\theta,\gamma,\varphi)$ находили как среднее число ионов, рассеянных в пределах каждого элементарного телесного угла в расчете на единичный телесный угол, и затем осуществляли их нормировку аналогично работе [11]. Полученные зависимости для кремния и диоксида кремния незначительно различались [11]. Функции распределения $f_{E_{Si},E_{SiO_2}}(\theta,E)$ находили для различных углов падения ионного пучка θ путем разбиения диапазона энергий обратно рассеянных ионов на интервалы с шагом 3 кэВ и осуществляли их нормировку на единичное значение [11]. На рис. 4, *б* показаны вычисленные распределения для $\theta=70°$ и $\theta=85°$. Из представленных графиков видно, что функции $f_{E_{Si}}(\theta,E)$ и $f_{E_{SiO_2}}(\theta,E)$ имеют хорошее соответствие и для обоих материалов с увеличением угла падения возрастает доля отраженных ионов с большими значениями энергии.

Для выбранных значений энергии отраженных ионов вычисляли скорости распыления кремния и диоксида кремния этими ионами от угла их падения θ' на поверхность подложки, а затем с учетом полученных функций $f_{E_{Si}}(\theta,E)$ и $f_{E_{SiO_2}}(\theta,E)$ определяли усредненные распределения таких скоростей $Q^b_{Si}(\theta')$ и $Q^b_{SiO_2}(\theta')$ для каждого материала (рис. 4, *в*). Как и в случае зависимостей, приведенных на рис. 2, усредненные скорости распыления отраженными ионами являются практически одинаковыми для кремния и диоксида кремния. Из рис. 4, *в* также следует, что при угле падения ионного пучка θ = 70° скорости $Q^b_{Si}(\theta')$ и $Q^b_{SiO_2}(\theta')$ заметно меньше, чем при θ = 85°, поскольку в последнем случае в соответствии с рис. 4, *б* велика доля отраженных ионов с большими значениями энергии.

Сравнение результатов расчетов и эксперимента. Моделирование формирования углублений в кремнии и диоксиде кремния проводили при параметрах распыления методом ФИП материалов, использованных в эксперименте. Расчетные профили поперечных сечений углублений, наложенные на экспериментальные РЭМ-микрофотографии, представлены на рис. 1, *а*–*г* (см. 4-ю с. обложки).

Для углублений первого типа с низким аспектным отношением расчетные профили для обоих материалов корректно описывают форму экспериментально полученных структур и с хорошей точностью предсказывают их глубину (рис. 1, *а*, *в*, см. 4-ю с. обложки). Некоторое расхождение между расчетными и экспериментальными данными выявляется в случае углубления в кремнии, для которого моделирование предсказывает выпуклую форму поверхности левой боковой стенки, в то время как эта поверхность в экспериментально полученной структуре практически плоская. Для углублений второго типа с высоким аспектным отношением моделирование с хорошей точностью предсказывает форму и глубину структур, сформированных в кремнии (рис. 1, *б*, см. 4-ю с. обложки). В случае диоксида кремния вычисленный профиль достаточно точно описывает форму левой боковой стенки углубления с заметным слоем переосажденного материала, однако его глубина на этом профиле примерно на 10 % меньше, чем на экспериментальном изображении (рис. 1, *г*, см. 4-ю с. обложки).

Наблюдаемые расхождения результатов моделирования с экспериментальными данными могут быть связаны с недостаточно точными угловыми зависимостями коэффициентов распыления отраженными ионами, полученными методом Монте-Карло. В случае кремния заметные различия в экспериментальных данных по угловой зависимости коэффициента распыления, согласно работе [18], могут являться одной из причин таких расхождений. Несовпадение глубины прямоугольного углубления в диоксиде кремния с результатами моделирования на рис. 1, *г* (см. 4-ю с. обложки) может быть обусловлено возможными вариациями плотности толстого слоя диоксида кремния, выращенного методом влажного окисления.

Заключение. Сравнение процессов распыления кремния и диоксида кремния методом ФИП показало, что структуры в обоих материалах, полученные в одних и тех же экспериментальных условиях, имеют приблизительно одинаковую глубину и близкую форму. Моделирование, учитывающее переосаждение распыленного материла, а также распыление отраженными ионами падающего пучка, с приемлемой точностью описывает форму всех изученных структур, кроме углублений с высоким аспектным отношением в диоксиде кремния, глубина которых на расчетном профиле примерно на 10 % меньше, чем в эксперименте.

Из полученных результатов следует, что при использовании одинаковых шаблонов сканирования ионного пучка по поверхности образца в кремнии и диоксиде кремния формируются близкие по форме углубления, что существенно упрощает применение метода ФИП при создании структур в этих широко применяемых в нанотехнологиях материалах.

Литература

1. A review of recent applications of ion beam techniques on nanomaterial surface modification: Design of nanostructures and energy harvesting / ***W. Li, X. Zhan, X. Song et al.*** // Small. 2019. Vol. 15. Iss. 31. Art. ID: 1901820. https://doi.org/10.1002/smll.201901820

2. Recent advances in focused ion beam nanofabrication for nanostructures and devices: Fundamentals and applications / ***P. Li, S. Chen, H. Dai et al.*** // Nanoscale. 2021. Vol. 13. Iss. 3. P. 1529–1565. https://doi.org/10.1039/D0NR07539F

3. A review of focused ion beam applications in optical fibers / ***K. Sloyan, H. Melkonyan, H. Apostoleris et al.*** // Nanotechnology. 2021. Vol. 32. No. 47. Art. ID: 472004. https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac1d75

4. Comparative study of plasmonic antennas fabricated by electron beam and focused ion beam lithography / ***M. Horák, K. Bukvišová, V. Švarc et al.*** // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. Iss. 1. Art. No. 9640. https://doi.org/10.1038/s41598-018-28037-1

5. ***Ha S.-J., Yoon S.-J., Baek S.-Y., Jung S.-T.*** A study on the development of sub-micron single-crystal diamond tools for machining diffractive optical elements // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2023. Vol. 126. P. 4399–4406. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11374-5

6. ***Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J.*** TEM sample preparation and FIB-induced damage // MRS Bulletin. 2007. Vol. 32. Iss. 5. P. 400–407. https://doi.org/10.1557/mrs2007.63

7. ***Drezner Y., Greenzweig Y., Raveh A.*** Strategy for focused ion beam compound material removal for circuit editing // J. Vac. Sci. Technol. B. 2012. Vol. 30. Iss. 1. Art. No. 011207. https://doi.org/10.1116/1.3674280

8. Comparison of silicon and 4H silicon carbide patterning using focused ion beams / ***S. K. P. Veerapandian, S. Beuer, M. Rumler et al.*** // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2015. Vol. 365 (A). P. 44–49. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.079

9. Ion channeling effects on the focused ion beam milling of Cu / ***B. W. Kempshall, S. M. Schwarz, B. I. Prenitzer et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2001. Vol. 19. Iss. 3. P. 749–754. https://doi.org/10.1116/1.1368670

10. ***Frey L., Lehrer C., Ryssel H.*** Nanoscale effects in focused ion beam processing // Appl. Phys. A. 2003. Vol. 76. P. 1017–1023. https://doi.org/10.1007/s00339-002-1943-1

11. ***Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Volkov R. L., Chaplygin Yu. A.*** Study of silicon dioxide focused ion beam sputtering using electron microscopy imaging and level set simulation // Vacuum. 2022. Vol. 202. Art. ID: 111128. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111128

12. Full three-dimensional simulation of focused ion beam micro/nanofabrication / ***H.-B. Kim, G. Hobler, A. Steiger et al.*** // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. No. 24. Art. ID: 245303. https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/24/245303

13. Simulating advanced focused ion beam nanomachining: A quantitative comparison of simulation and experimental results / ***K. T. Mahady, S. Tan, Y. Greenzweig et al.*** // Nanotechnology. 2018. Vol. 29. No. 49. Art. ID: 495301. https://doi.org/10.1088/1361-6528/aae183

14. Level set approach for the simulation of focused ion beam processing on the micro/nano scale / ***H.-B. Kim, G. Hobler, A. Steiger et al.*** // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. No. 26. Art. ID: 265307. https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/26/265307

15. ***Боргардт Н. И., Волков Р. Л., Румянцев А. В., Чаплыгин Ю. А.*** Моделирование распыления материалов фокусированным ионным пучком // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 12. С. 97–104. EDN: UJMTSV.

16. Inverse modeling of FIB milling by dose profile optimization / ***S. Lindsey, S. Waid, G. Hobler et al.*** // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2014. Vol. 341. P. 77–83. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.09.006

17. Sputtering of redeposited material in focused ion beam silicon processing / ***N. I. Borgardt, A. V. Rumyantsev, R. L. Volkov et al.*** // Mater. Res. Express. 2018. Vol. 5. No. 2. Art. No. 025905. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1

18. ***Lindsey S., Hobler G.*** Sputtering of silicon at glancing incidence // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2013. Vol. 303. P. 142–147. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.087

19. ***Burenkov A., Sekowski M., Belko V., Ryssel H.*** Angular distributions of sputtered silicon at grazing gallium ion beam incidence // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2012. Vol. 272. P. 23–27. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.01.025

20. ***Румянцев А. В., Боргардт Н. И., Волков Р. Л.*** Моделирование распыления многослойных подложек фокусированным ионным пучком // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. № 10. С. 39–42. https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.10.55433.19533. – EDN: AIVWLW.

21. ***Canny J.*** A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. PAMI-8. No. 6. P. 679–698. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851

22. ***Gibou F., Fedkiw R., Osher S.*** A review of level-set methods and some recent applications // J. Comput. Phys. 2018. Vol. 353. P. 82–109. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.10.006

23. Probe current distribution characterization technique for focused ion beam / ***Sh. Tan, R. Livengood, Yu. Greenzweig et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2012. Vol. 30. Iss. 6. Art. ID: 06F606. https://doi.org/10.1116/1.4766882

24. ***Manstetten P., Weinbub J., Hössinger A., Selberherr S.*** Using temporary explicit meshes for direct flux calculation on implicit surfaces // Procedia Comput. Sci. 2017. Vol. 108. P. 245–254. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.067

25. SDTrimSP Version 5.05 / ***A. Mutzke, R. Schneider, W. Eckstein et al.*** Garching: IPP, 2015. 70 p.

Статья поступила в редакцию 20.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.08.2023 г.; принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

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

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

References

1. Li W., Zhan X., Song X., Si S., Chen R., Liu J., Wang Z., He J., Xiao X. A review of recent applications of ion beam techniques on nanomaterial surface modification: Design of nanostructures and energy harvesting. *Small,* 2019, vol. 15, iss. 31, art. ID: 1901820. https://doi.org/10.1002/smll.201901820

2. Li P., Chen S., Dai H., Yang Z., Chen Z., Wang Y., Chen Y., Peng W., Shan W., Duan H. Recent advances in focused ion beam nanofabrication for nanostructures and devices: Fundamentals and applications. *Nanoscale,* 2021, vol. 13, iss. 3, pp. 1529–1565. https://doi.org/10.1039/D0NR07539F

3. Sloyan K., Melkonyan H., Apostoleris H., Dahlem M. S., Chiesa M., Al Ghaferi A. A review of focused ion beam applications in optical fibers. *Nanotechnology,* 2021, vol. 32, no. 47, art. ID: 472004. https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac1d75

4. Horák M., Bukvišová K., Švarc V., Jaskowiec J., Křápek V., Šikola T. Comparative study of plasmonic antennas fabricated by electron beam and focused ion beam lithography. *Sci. Rep.,* 2018, vol. 8, iss. 1, art. no. 9640. https://doi.org/10.1038/s41598-018-28037-1

5. Ha S.-J., Yoon S.-J., Baek S.-Y., Jung S.-T. A study on the development of sub-micron single-crystal diamond tools for machining diffractive optical elements. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.,* 2023, vol. 126, pp. 4399–4406. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11374-5

6. Mayer J., Giannuzzi L. A., Kamino T., Michael J. TEM sample preparation and FIB-induced damage. *MRS Bulletin,* 2007, vol. 32, iss. 5, pp. 400–407. https://doi.org/10.1557/mrs2007.63

7. Drezner Y., Greenzweig Y., Raveh A. Strategy for focused ion beam compound material removal for circuit editing. *J. Vac. Sci. Technol. B,* 2012, vol. 30, iss. 1, art. no. 011207. https://doi.org/10.1116/1.3674280

8. Veerapandian S. K. P., Beuer S., Rumler M., Stumpf F., Thomas K., Pillatsch L., Michler J., Frey L., Rommel M. Comparison of silicon and 4H silicon carbide patterning using focused ion beams. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B,* 2015, vol. 365 (A), pp. 44–49. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.079

9. Kempshall B. W., Schwarz S. M., Prenitzer B. I., Giannuzzi L. A., Irwin R. B., Stevie F. A. Ion channeling effects on the focused ion beam milling of Cu. *J. Vac. Sci. Technol. B,* 2001, vol. 19, iss. 3, pp. 749–754. https://doi.org/10.1116/1.1368670

10. Frey L., Lehrer C., Ryssel H. Nanoscale effects in focused ion beam processing. *Appl. Phys. A,* 2003, vol. 76, pp. 1017–1023. https://doi.org/10.1007/s00339-002-1943-1

11. Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Volkov R. L., Chaplygin Yu. A. Study of silicon dioxide focused ion beam sputtering using electron microscopy imaging and level set simulation. *Vacuum,* 2022, vol. 202, art. ID: 111128. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111128

12. Kim H.-B., Hobler G., Steiger A., Lugstein A., Bertagnolli E. Full three-dimensional simulation of focused ion beam micro/nanofabrication. *Nanotechnology,* 2007, vol. 18, no. 24, art. ID: 245303. https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/24/245303

13. Mahady K. T., Tan S., Greenzweig Y., Raveh A., Rack P. D. Simulating advanced focused ion beam nanomachining: a quantitative comparison of simulation and experimental results. *Nanotechnology*, 2018, vol. 29, no. 49, art. ID: 495301. https://doi.org/10.1088/1361-6528/aae183

14. Kim H.-B., Hobler G., Steiger A., Lugstein A., Bertagnolli E. Level set approach for the simulation of focused ion beam processing on the micro/nano scale. *Nanotechnology*, 2007, vol. 18, no. 26, art. ID: 265307. https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/26/265307

15. Borgardt N. I., Volkov R. L., Rumyantsev A. V., Chaplygin Yu. A. Simulation of material sputtering with a focused ion beam. *Tech. Phys. Lett.*, 2015, vol. 41, pp. 610–613. https://doi.org/10.1134/S106378501506019X

16. Lindsey S., Waid S., Hobler G., Wanzenböck H. D., Bertagnolli E. Inverse modeling of FIB milling by dose profile optimization. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 2014, vol. 341, pp. 77–83. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.09.006

17. Borgardt N. I., Rumyantsev A. V., Volkov R. L., Chaplygin Yu. A. Sputtering of redeposited material in focused ion beam silicon processing. *Mater. Res. Express*, 2018, vol. 5, no. 2, art. no. 025905. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1

18. Lindsey S., Hobler G. Sputtering of silicon at glancing incidence. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 2013, vol. 303, pp. 142–147. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.087

19. Burenkov A., Sekowski M., Belko V., Ryssel H. Angular distributions of sputtered silicon at grazing gallium ion beam incidence. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 2012, vol. 272, pp. 23–27. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.01.025

20. Rumyantsev A. V., Borgardt N. I., Volkov R. L. Simulation of focused ion beam milling of multilayer substrates. *Pis'ma v ZhTF = Tech. Phys. Lett.*, 2023, iss. 5, pp. 77–80. https://doi.org/10.21883/TPL.2023.05.56035.19533

21. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851

22. Gibou F., Fedkiw R., Osher S. A review of level-set methods and some recent applications. *J. Comput. Phys.*, 2018, vol. 353, pp. 82–109. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.10.006

23. Tan Sh., Livengood R., Greenzweig Yu., Drezner Y., Shima D. Probe current distribution characterization technique for focused ion beam. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2012, vol. 30. iss. 6, art. ID: 06F606. https://doi.org/10.1116/1.4766882

24. Manstetten P., Weinbub J., Hössinger A., Selberherr S. Using temporary explicit meshes for direct flux calculation on implicit surfaces. *Procedia Comput. Sci.*, 2017, vol. 108, pp. 245–254. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.067

25. Mutzke A., Schneider R., Eckstein W. et al. *SDTrimSP Version 5.05*. Garching, IPP, 2015. 70 p.

The article was submitted 20.07.2023; approved after reviewing 29.08.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

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

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

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Original article
УДК 621.382.049.58
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-42-51
EDN: WFESBP

Optimization of the audio-frequency voltage-controlled oscillator

H. A. Babajanyan[1,2], S. Kh. Khudaverdyan[1]

[1]*National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia*
[2]*"Synopsys Armenia" CJSC, Yerevan, Armenia*

babajany@synopsys.com

Abstract. The main working principle of voltage-controlled oscillator (VCO) circuits is based on self-generation of the output signal. The circuit components that enable self-oscillation can cause excess increase or decrease of the signal, resulting in amplitude noise. In the audio-frequency VCO, the standard capacitor or buffer can be used to reduce the noise. However, capacitor or buffer can modify the rise / fall time of the signal, which will lead to a change in the signal period. Additionally, these elements increase the circuit area. In this work, a new method for optimizing the audio-frequency VCO circuit is presented. The method is based on using, instead of an output operational amplifier, a simple circuit consisting of a Schmitt trigger and inverters and having smaller area compared to the operational amplifier. This makes it possible to get clear square signal. In addition, there is no need to use the resistors placed on the positive input of the operational amplifier. The folded cascode operational amplifier is used in the circuit. All other circuit components are the same as they were before the proposed method was used. It was demonstrated that the method under consideration lowers the output noise, allows the increase of the output characteristics linearity and the decrease of surface area of the audio-frequency VCO. It has been established that in the audio-frequency VCO designed in 32 nm technology, the noise is reduced by 30 %, the linearity error by 17 %, and the area by 28 %.

Keywords: voltage-controlled oscillator, Schmitt trigger, inverter, operational amplifier, resistor, capacitor

For citation: Babajanyan H. A., Khudaverdyan S. Kh. Optimization of the audio-frequency voltage-controlled oscillator. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 42–51. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-42-51. – EDN: WFESBP.

© H. A. Babajanyan, S. Kh. Khudaverdyan, 2024

Научная статья

Оптимизация аудиочастотного генератора, управляемого напряжением

***А. А. Бабаджанян*[1,2], *С. Х. Худавердян*[1]**

[1]*Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван, Армения*
[2]*«Синопсис Армения», г. Ереван, Армения*

babajany@synopsys.com

Аннотация. Основной принцип работы схем генератора, управляемого напряжением (ГУН), основан на самогенерации выходного сигнала. Компоненты схемы, которые делают возможным автоколебание сигнала, могут быть причиной избыточного увеличения или уменьшения сигнала, что ведет к шуму в сигнале. В случае аудиочастотного ГУН для минимизации шума можно использовать обычный конденсатор или инвертор. Однако конденсатор или инвертор могут изменить время нарастания / спада сигнала, что приведет к изменению периода сигнала. Кроме того, эти элементы увеличивают площадь схемы. В работе представлен новый метод для оптимизации схемы аудиочастотного ГУН. Метод основан на использовании вместо выходного операционного усилителя более простой схемы, состоящей из триггера Шмитта и инверторов и имеющей меньшую площадь по сравнению с операционным усилителем. Это дает возможность получать четкий прямоугольный сигнал. Также нет необходимости использовать резисторы, размещенные на положительном входе операционного усилителя. В схеме применен свернутый каскодный операционный усилитель. Все остальные составляющие схемы те же, что и до применения предлагаемого метода. Показано, что использование рассматриваемого метода снижает уровень выходных шумов, позволяет увеличить линейность выходной характеристики и уменьшить площадь контура аудиочастотного ГУН. Установлено, что в аудиочастотном ГУН, разработанном по 32-нм технологии, шумы уменьшаются на 30 %, ошибка линейности уменьшается на 17 %, а площадь сокращается на 28 %.

Ключевые слова: генератор, управляемый напряжением, триггер Шмитта, инвертор, операционный усилитель, резистор, конденсатор

Для цитирования: Бабаджанян А. А., Худавердян С. Х. Оптимизация аудиочастотного генератора, управляемого напряжением // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 42–51. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-42-51. – EDN: WFESBP.

Introduction. There are a number of known types of voltage-controlled oscillator (VCO) circuits, for example, crystal oscillator, or LC circuit, or multivibrator, or RC-oscillator. In the basic VCO oscillator, when control voltage V_c increases above the nominal value the output frequency also increases. Inversely, the output frequency decreases at the decrease of V_c below the nominal value. There are two major categories of VCO: harmonic oscillators that produce sinusoidal output signal, and relaxation oscillators that generate a sawtooth or triangle waveform.

One of the most important issues for the VCO circuit is amplitude noise problem. In harmonic oscillators, the stability of noise frequency and temperature is better compared with relaxation oscillators. The disadvantage of harmonic oscillator is that it's not implemented in simple way for a monolithic IC. The common form of relaxation oscillator is a VCO with comparator, integrator, switch and Schmitt trigger. Generally, the operational amplifier (OpAmp) with input resistors and feedback resistor is used as a Schmitt trigger.

Literature review. There are several methods using the Schmitt trigger to improve the working process of oscillators. In [1], the optimization approach for the Schmitt trigger circuit is shown. The authors describe many properties and features of the Schmitt trigger and demonstrate its applicability. In [2], the Schmitt trigger is used to obtain a wider operating range for the digital-controlled oscillator (DCO), thus enabling the DCO to have segmental coarse-tuning and fine-tuning stages. Table 1 shows the power performance of different tuning stages and the path selector MUX.

Table 1

Power performance of different tuning stages and path selector MUX

Tuning stage	Design	Power 215 MHz	Power 750 MHz
Coarse tuning	Conventional	86.55 uW	245.75 uW
	Proposed in [2]	77.21 uW	28.86 uW
	Improvement percent	10.8 %	88.3 %
Path selector MUX	Conventional	6.617 uW	–
	Proposed in [2]	3.91 uW	–
	Improvement percent	45.8 %	–
Fine tuning	Approach 1	465.92 uW	–
	Approach 2	207.64 uW	–
	Proposed in [2]	56.22 uW	–

In [3], clean square signals are generated from noisy input signals using a Schmitt trigger in the current starved VCO circuit. This method also improves the working process of the phase-locked loop (PLL) circuit. The frequency ranges for different values of the control voltage set by the control mechanisms described in [3] are given below:

0.42 V ..... 152.89 MHz
0.6 V ..... 686.01 MHz
0.8 V ..... 1.315 GHz
1.0 V ..... 1.7970 GHz
1.2 V ..... 2.1819 GHz
1.4 V ..... 2.4643 GHz
1.8 V ..... 2.873 GHz
2.0 V ..... 2.9971 GHz
2.2 V ..... 3.0 GHz
2.4 V ..... 3.134 GHz
2.6 V ..... 3.2 GHz
2.8 V ..... 3.2209 GHz
3.0 V ..... 3.2406 GHz

In [4], a process, voltage, and temperature independent (PVT insensitive) Schmitt trigger with fully adjustable hysteresis is presented. The modifications done to the circuit make it more applicable for use in digital systems. The principle of the new method is the use of a Schmitt trigger circuit as part of an audio-frequency VCO circuit. That has been done for the first time on this circuit type. A performance comparison of the proposed method with other works is shown in table 2.

Table 2

Comparison of proposed method with other works

Referent criterion	Sources				Proposed work
	[1]	[2]	[3]	[4]	
Consumed current	3.4 uA	q.5 mA	N / A	N / A	2.51 uA
Supply voltage	3 V	1 V	3.3 V	2 V	1 V
Power consumption	10.2 uW	1.5 mW	N / A	N / A	2.51 uW
Process	180 nm	250 nm	130 nm	180 nm	130 nm
Signal frequency	1.25 Hz	2 MHz	133 MHz	50 Hz	5 MHz
Application	Sensing node	Sensing node	High-speed buffer	Sensing node	Sensing node
Structure	Traditional open-loop comparator	Traditional close-loop comparator	Modified traditional Schmitt trigger	Inverter-comparator based Schmitt trigger	Inverter-comparator based Schmitt trigger
Hysteresis	Adjustable	Fixed	Fixed	Adjustable	Adjustable
PVT sensitivity	Insensitive	Sensitive	Insensitive	Insensitive	Insensitive

In [5], the importance of the Schmitt trigger in low voltage CMOS oscillators is substantiated. The general dangers of amplitude noise are described in [6–9].

The proposed audio-frequency VCO circuit optimization. An experiment was conducted to improve the audio-frequency VCO circuit using a Schmitt trigger. In the primary circuit of the audio-frequency VCO (fig. 1, *a*), the output signal is formed by the large current flowing process in the inner circuit of the OpAmp and through the input and feedback loop resistors. The output signal is subject to noise and rise and fall times. Although noises can be removed by using a capacitor or inverter in the output, these components increase the circuit area and change the rise / fall time in the output, which leads to a change in the signal period.

The proposed method reduces amplitude noises, increases the linearity of output characteristics, and decreases the circuit area. Using a Schmitt trigger instead of the OpAmp with resistors allows the elimination of many known disadvantages. The size of the Schmitt trigger is chosen in a way that its high and low switching voltages match the high and low voltages of the triangle output of the first OpAmp in the primary audio-frequency VCO. Using a buffer after the Schmitt trigger is preferred to obtain a clear square signal. The Schmitt trigger has transistors whose sizes can be adjusted to make the high and low switching voltages more constant, resulting in more linear output characteristics for the audio-frequency VCO. Together, the Schmitt trigger and buffer occupy lesser area than the OpAmp with input and feedback loop resistors. The buffer provides an almost noiseless output signal: in the primary circuit output the noise error is 33 % and in the optimized circuit it is 3 %. The available sizes in the Schmitt trigger provide a more linear input voltage and output frequency dependency. The buffer also helps to make the output signal period more suitable for the output signal of the primary circuit. The optimized audio-frequency VCO is shown in fig. 1, *b*.

The condition that may be regarded as a disadvantage is that instead of using a ready-made OpAmp, it is necessary to determine the most suitable sizes for the Schmitt trigger to achieve the best possible performance for the audio-frequency VCO. Fig. 2 illustrates the real Schmitt trigger circuit.

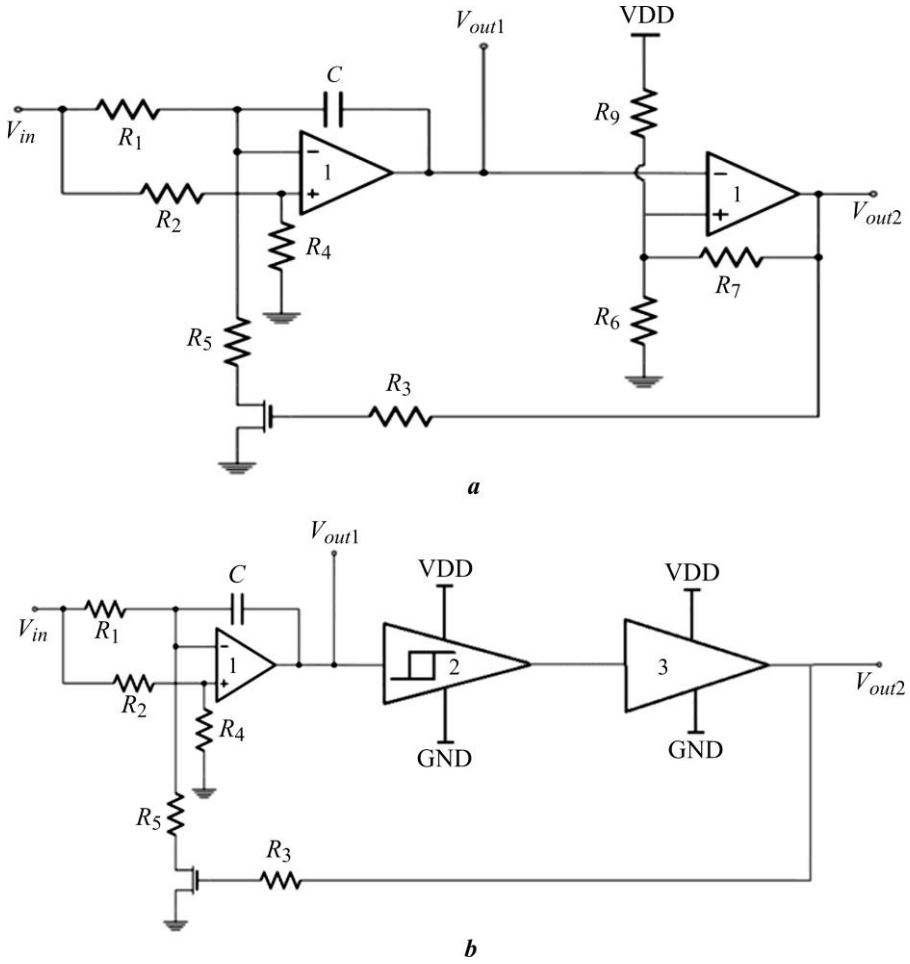


Fig. 1. The primary (*a*) and optimized (*b*) circuits of audio-frequency VCO: 1 – OpAmp; 2 – Schmitt trigger; 3 – buffer

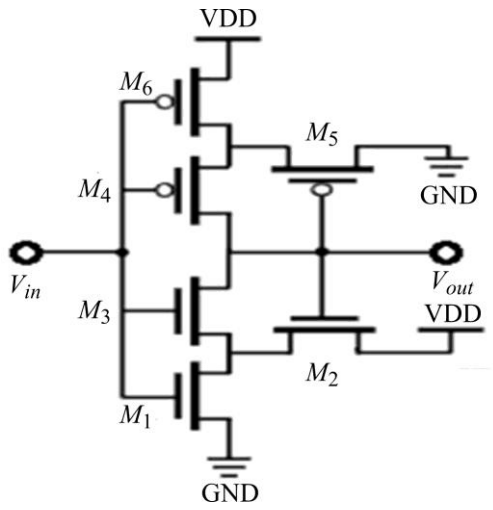


Fig. 2. A Schmitt trigger circuit

Increasing the W sizes of M_6 and M_2 transistors in the Schmitt trigger circuit makes it work more strictly, thereby enhancing the linearity of the audio-frequency VCO output characteristics.

Simulation results. The primary block of the audio-frequency VCO was designed and simulations carried out using the HSPICE simulator (as described in [10]) for several PVT corners, including TT, FF (fast-*n* fast-*p*), and SS (slow-*n* slow-*p*) processes with their respective voltage and temperature values. Simulation results given hereinafter are presented for the typical TT corner. The circuit was designed and simulated using the 32 nm technology, with input voltage ranging from 0.5 to 2.5 V and the output frequency ranging from 1.76 to 6.9 MHz.

The primary circuit of the audio-frequency VCO designed using the 32 nm technology is shown in fig. 3, *a*, and the optimized circuit of audio-frequency VCO designed in this technology, in fig. 3, *b*.

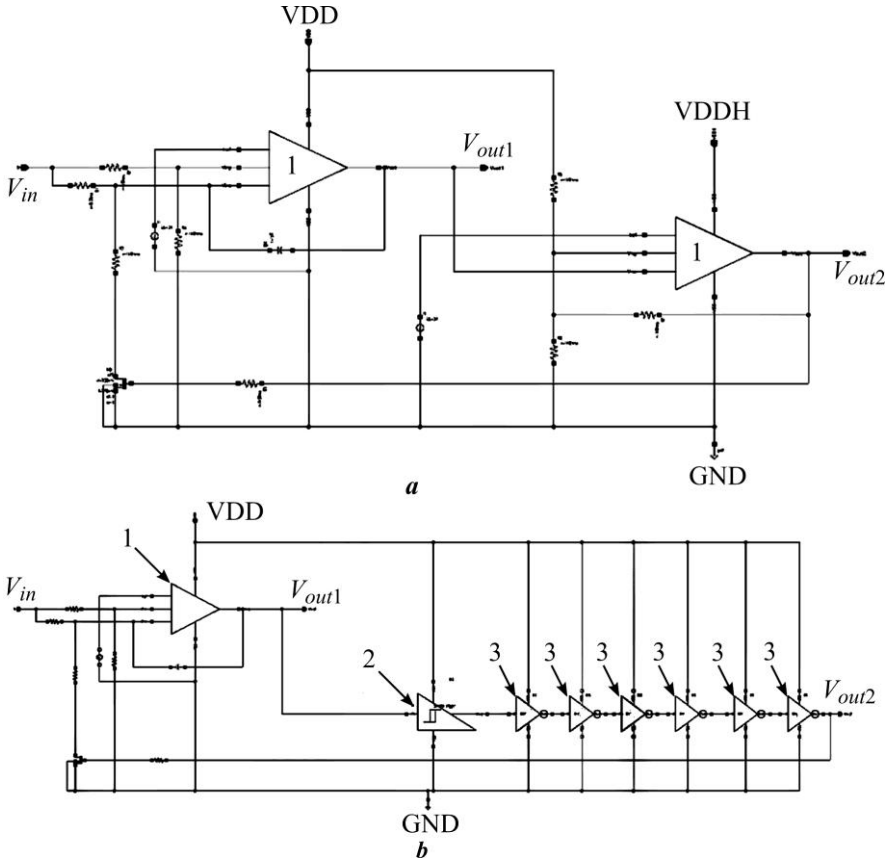


Fig. 3. The primary (*a*) and optimized (*b*) circuits of audio-frequency VCO designed in 32 nm technology: 1 – OpAmp; 2 – Schmitt trigger; 3 – inverter

Fig. 4 shows the input and output signals of the second OpAmp used as Schmitt trigger in the primary circuit of audio-frequency VCO for input voltages of 0.5 and 2.5 V; fig. 5 shows the input and output signals of the real Schmitt trigger in the optimized circuit of audio-frequency VCO for the same input voltage values, and the combined output characteristics of the primary, optimized, and ideal audio-frequency VCO are shown in fig. 6.

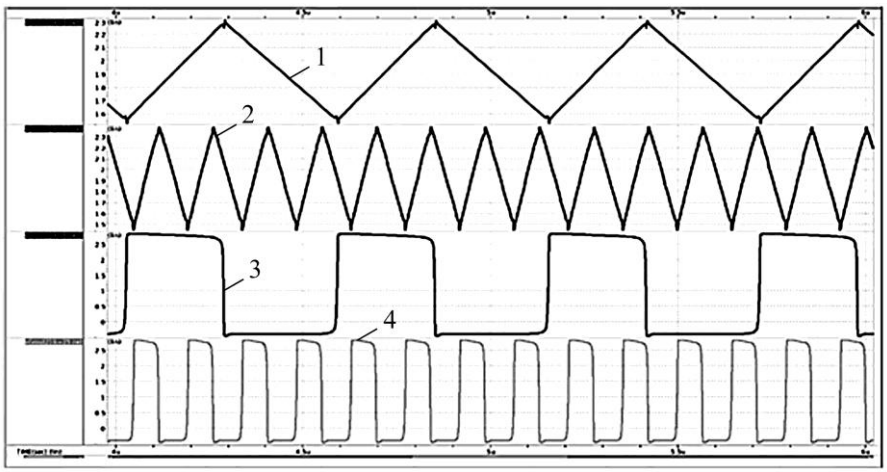


Fig. 4. The triangle input signals in case of V_{in} = 0.5 V (Signal 1) and V_{in} = 2.5 V (Signal 2), and the square output signals in case of V_{in} = 0.5 V (Signal 3) and V_{in} = 2.5 V (Signal 4) of the second OpAmp used as Schmitt trigger in the primary circuit of audio-frequency VCO

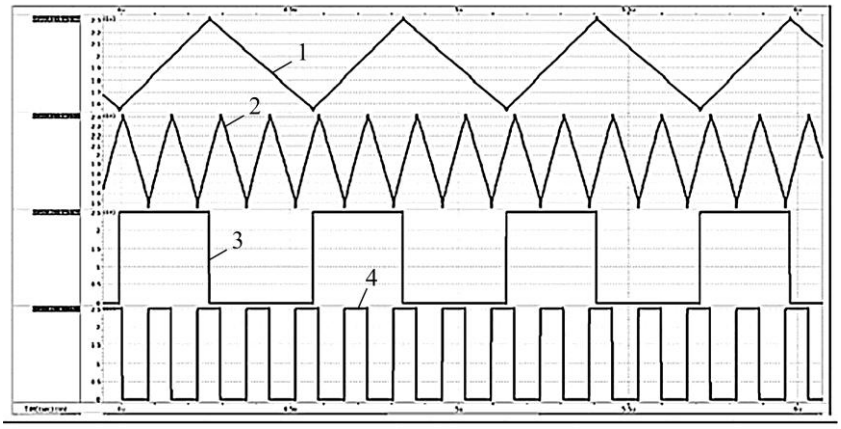


Fig. 5. The triangle input signals in case of V_{in} = 0.5 V (Signal 1) and V_{in} = 2.5 V (Signal 2), and the square output signals in case of V_{in} = 0.5 V (Signal 3) and V_{in} = 2.5 V (Signal 4) of the real Schmitt trigger in the optimized circuit of audio-frequency VCO

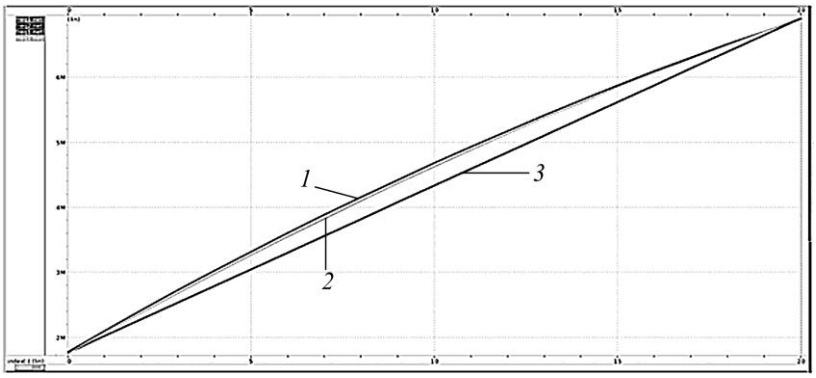


Fig. 6. The combined output characteristics of the primary (*1*), optimized (*2*) and ideal (*3*) audio-frequency VCO circuits

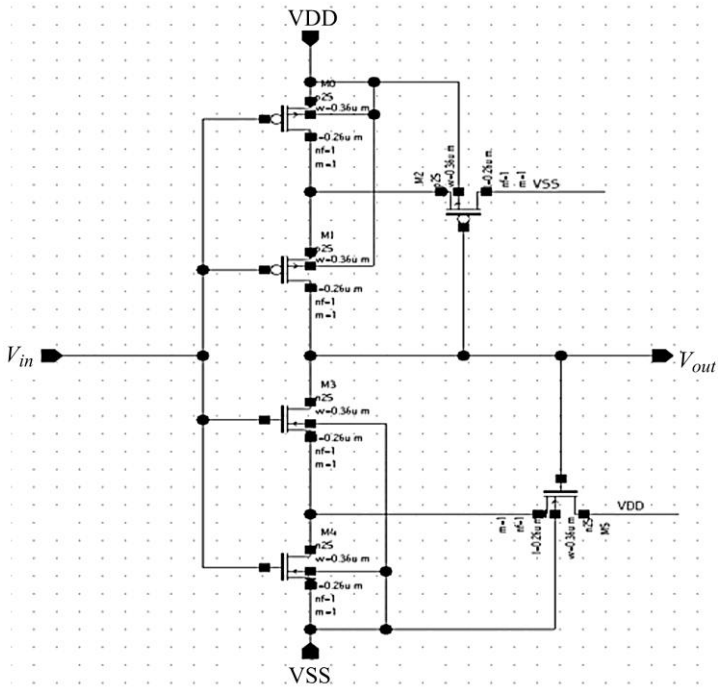


Fig. 7. The Schmitt trigger circuit designed in 32 nm technology

Using the proposed method, it is possible to decrease the linearity error by 17 %, the noise error by 30 %, and the circuit area by 28 %. The noise error is calculated by dividing the additional voltage (noise amplitude) by the supply voltage and multiplying it by 100 %. The decrease of the linearity error was measured for the case in which the input voltage is equal to 1.5 V. This value was chosen for the measurement because it is the middle value where the linearity error is the highest. The decrease of the linearity error $Linearity - error_{decr}$ is calculated by the following formula:

$$Linearity - error_{decr} = (f_{opt} - f_{prim}) / (f_{opt} - f_{id}) \cdot 100\ \%,$$

where f_{opt} is output frequency of the optimized audio-frequency VCO; f_{prim} is output frequency of the primary audio-frequency VCO; f_{id} is output frequency of the ideal audio-frequency VCO.

The circuit of the Schmitt trigger designed in 32 nm technology is shown in fig. 7, the combined input and output signals of the Schmitt trigger are shown in fig. 8, and the circuit of OpAmp designed in 32 nm technology is shown in fig. 9.

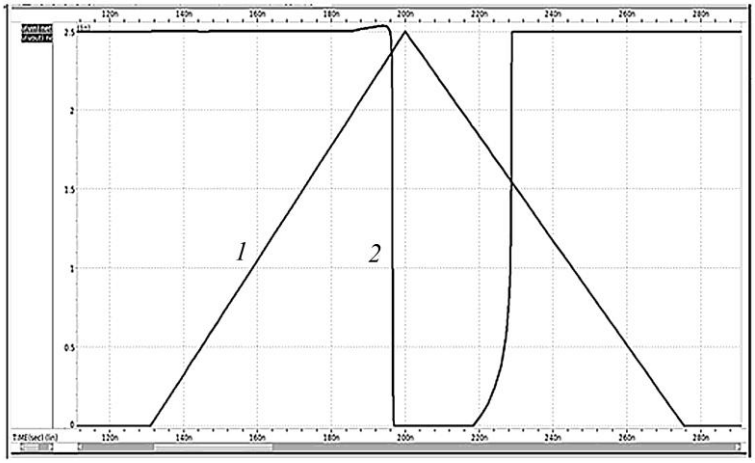


Fig. 8. The combined input (*1*) and output (*2*) signals of the Schmitt trigger

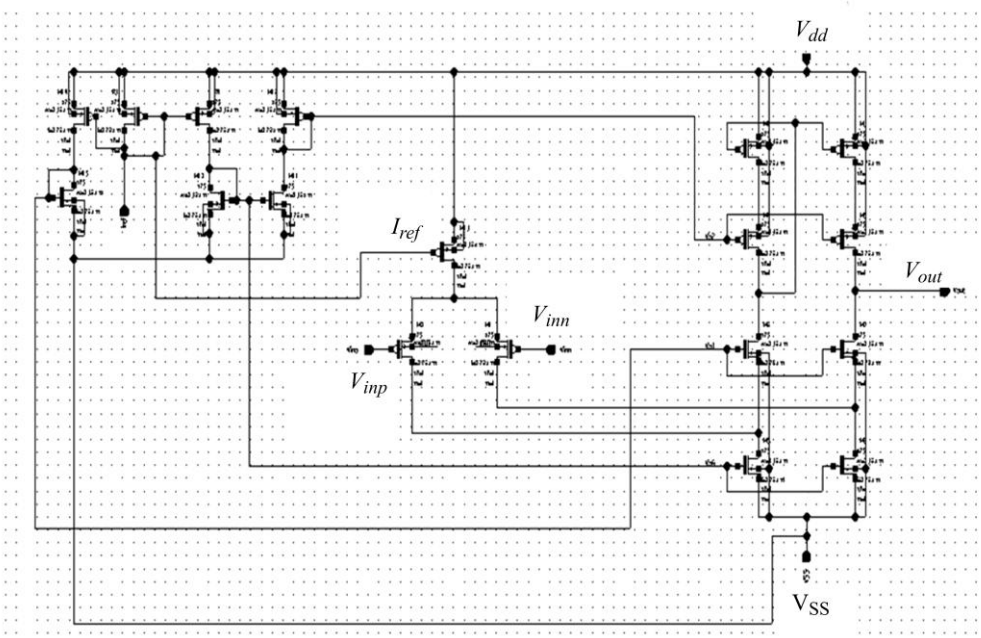


Fig. 9. The circuit of OpAmp designed in 32 nm technology

The gain of the folded cascade OpAmp designed in 32 nm technology is 52 dB, and the phase margin is –118°. Below are the sizes of the transistors used in the OpAmp:

xm12 vb2 vb2 vdd vdd p25 w = 2.442u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xr4 vb4 iref vdd vdd p25 w = 30.86u l = 0.26u nf = 1 m = 4;
xr3 iref iref vdd vdd p25 w = 8.46u l = 0.26u nf = 1 m = 4;
xm13 net5 iref vdd vdd p25 w = 30.76u l = 0.26u nf = 1 m = 32;
xm5 vout vb2 net1 vdd p25 w = 20.36u l = 0.26u nf = 1 m = 10;
xm4 net23 vb2 net3 vdd p25 w = 20.36u l = 0.26u nf = 1 m = 10;
xm3 net1 net23 vdd vdd p25 w = 11.76u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm2 net3 net23 vdd vdd p25 w = 11.76u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm1 net2 vinn net5 vdd p25 w = 45.05u l = 0.26u nf = 1 m = 25;
xm0 net4 vinp net5 vdd p25 w = 45.05u l = 0.26u nf = 1 m = 25;
xm14 vb1 iref vdd vdd p25 w = 11.76u l = 0.26u nf = 1 m = 4;
xm11 vb2 vb4 vss vss n25 w = 3.41u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm10 vb4 vb4 vss vss n25 w = 3.85u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm9 net2 vb4 vss vss n25 w = 17.75u 1 = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm8 net4 vb4 vss vss n25 w = 17.75u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm7 vout vb1 net2 vss n25 w = 61.56u l = 0.61u nf = 1 m = 10;
xm6 net23 vb1 net4 vss n25 w = 61.56u l = 0.61u nf = 1 m = 10;
xm15 vb1 vb1 vss vss n25 w = 0.255u l = 0.26u nf = 1 m = 1.

The sizes of the Schmitt trigger are listed below:

xm2 vss vout net5 vdd p25 w = 0.36u l = 0.76u nf = 1 m = 1;
xm1 vout vin net5 vdd p25 w = 15.36u l = 0.26u nf = 1q m = 1;
xm0 net5 vin vdd vdd p25 w = 45.36u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm5 vdd vout net17 vss n25 w = 62.3u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm4 net17 vin vss vss n25 w = 1.36u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm3 vout vin net17 vss n25 w =4.36u l = 0.26u nf = 1 m = 1.

In the proposed configuration, a buffer consisting of 6 sequentially connected inverters is used. Alternatively, only 2 inverters can be used. However, in the case of 6 inverters, the output frequency of the optimized audio-frequency VCO is exactly the same as that of the primary audio-frequency VCO circuit for input voltages of 0.5 and 2.5 V.

The sizes of the inverter that comes after the Schmitt trigger are:

xm0 VOUT VIN VSS VSS n25 w = 75.36u l = 0.26u nf = 1 m = 1;
xm1 VOUT VIN VDD VDD p25 w = 75.36u l = 0.26u nf = 1 m = 1.

Conclusion. A new method for the optimization of the audio-frequency VCO is proposed based on the principle of using a real Schmitt trigger and a buffer instead of an OpAmp with resistors in the positive input and feedback loop. High and low switching voltages of the Schmitt trigger were chosen appropriate to the high and low voltages of the triangle output signal of the first OpAmp. Thus the frequency range remains the same as in the primary circuit. The sizes of Schmitt trigger were chosen in order to obtain better linearity of output characteristics compared to primary circuit. In the audio-frequency VCO designed in 32 nm technology, the high switching voltage of Schmitt trigger is 2.4 V and the low switching voltage is 1.5 V. Input voltage changes from 0.5 to 2.5 V and output frequency range is 1.76–6.9 MHz. The following results have been obtained: linearity error of the output characteristics decreased by 17 %, noise error reduced by 30 % and the area of the circuit decreased by 28 %.

References

1. Shih-Lun C., Ming-Dou K. A new Schmitt trigger circuit in a 0.13-/spl mu/m 1/2.5-V CMOS process to receive 3.3-V input signals. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,* 2005, vol. 52, no. 7, pp. 361–365. https://doi.org/10.1109/TCSII.2005.850409

2. Majd N. E., Lotfizad M., Ghaznavi-Ghoushchi M. B., Abadian A. An ultra low-power digitally controlled oscillator using novel Schmitt-trigger based hysteresis delay cells. *IEICE Electronics Express,* 2011, vol. 8, iss. 8, pp. 589–595. https://doi.org/10.1587/elex.8.589

3. Purnima, Radba B. L., Kumaraswamy K. V. VLSI design and implementation of Schmitt trigger based VCO for PLL architecture. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering,* 2016, vol. 5, iss. 5, pp. 3547–3552.

4. Lin K., Wang X., Zhang X., Wang B., Ouyang T. A PVT-independent Schmitt trigger with fully adjustable hysteresis threshold voltages for low-power 1-bit digitization applications. *IEICE Electronics Express,* 2016, vol. 13, iss. 17, art. ID: 20160650. https://doi.org/10.1587/elex.13.20160650

5. Siniscalchi M. *On the design of ultra low voltage CMOS oscillators,* diss. for the Dr. Sci. (Electr. Eng.). Montevideo, 2020. xvi, 95 p.

6. Vibunjarone V., Prempraneerach Y. Improved noise reduction and frequency stability of VCO with external feedback loop. *International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications.* Xi'an, IEICE, 2002, pp. 743–746.

7. Ozharar S., Ozdur I. Amplitude noise suppression by intracavity phase modulation in a harmonically mode-locked laser. *Optics & Laser Technology,* 2018, vol. 105, pp. 322–324. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.033

8. Rossi C., Grigoli F., Gasperini P., Gandolfi S., Cocorullo C., Gukov T., Macini P. Estimation of amplitude noise reduction as a function of depth recorded by a deep vertical array (Northern Italy). *EGU General Assembly 2023 (23-28 April, 2023, Vienna, Austria).* Vienna, EGU, 2023. Art. ID: EGU23-1171. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1171

9. Tanaka A., Okamura Y., Takada A. Amplitude noise suppression of BPSK signals using transmission optical fibers and optical parametric phase-sensitive amplifiers. *IEICE Electronics Express,* 2022, vol. 19, iss. 13, art. no. 20220196. https://doi.org/10.1587/elex.19.20220196

10. *HSPICE Application Manual.* Synopsys Inc., 2010. 196 p.

The article was submitted 21.03.2023; approved after reviewing 31.07.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Hayk A. Babajanyan – PhD student of the Electronics, Biomedicine and Measuring Devices Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Engineer II, "Synopsys Armenia" CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshakunyats ave., 41), babajany@synopsys.com

Surik Kh. Khudaverdyan – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Acting Head of the Communication Systems Department, National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), xudaver13@mail.ru

Уважаемые авторы!

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

Научная статья
УДК 621.374.4
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-52-64
EDN: RKKOXV

Умножители частоты гармонического сигнала на управляемом фазовращателе

Е. Б. Колесников

Новомосковский институт (филиал) Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева, г. Новомосковск, Россия

Kolesnikov55@mail.ru

Аннотация. Умножители частоты гармонического сигнала позволяют получать стабильные колебания высокой частоты при относительно низкой частоте выходного сигнала задающего генератора. Существующие умножители частоты гармонического сигнала имеют невысокое быстродействие, низкий КПД, высокий уровень побочных гармоник и ограниченный диапазон рабочих частот. В работе описаны принципы построения и функционирования умножителей частоты гармонического сигнала, основные их недостатки и области применения. Предложен новый принцип умножения частоты синусоидального напряжения, основанный на регулировании фазы входного сигнала в пределах 360° фазовращателем, который управляется переменным напряжением, его амплитуда имеет пилообразную форму и равна амплитуде входного сигнала. Разработка и исследование умножителей частоты, реализующих предложенный принцип, осуществлены методами структурного проектирования и математического моделирования. Представлены результаты разработки гармонических удвоителя и утроителя частоты, которые имеют более высокие показатели, чем известные, и работают на основе предложенного принципа. Приведены их структурные схемы. Составлены имитационные модели рассматриваемых умножителей частоты в среде Matlab & Simulink и получены осциллограммы их работы, подтверждающие работоспособность данных умножителей и правильность выбора технических решений. Разработан управляемый умножитель частоты, имеющий высокое быстродействие, низкий уровень побочных гармоник, широкий диапазон рабочих частот и регулируемый коэффициент умножения, включая дробные его значения. Показано, что коэффициент умножения описанных умножителей частоты гармонического сигнала может достигать нескольких десятков.

Ключевые слова: умножитель частоты, управляемый фазовращатель, компаратор, одновибратор, интегратор со сбросом, перемножитель, счетный триггер, управляемый усилитель

Для цитирования: Колесников Е. Б. Умножители частоты гармонического сигнала на управляемом фазовращателе // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 52–64. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-52-64. – EDN: RKKOXV.

© Е. Б. Колесников, 2024

Original article

Harmonic signal frequency multipliers on controlled phase shifter

E. B. Kolesnikov

Novomoskovskiy Institute (branch) D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk, Russia

Kolesnikov55@mail.ru

Abstract. Harmonic signal frequency multipliers allow for attainment of stable high-frequency oscillations at relatively low frequency of reference generator output signal. The existing harmonic signal frequency multipliers have low speed, low efficiency, a high level of side harmonics and a limited range of operating frequencies. In this work, the principles of construction and functioning of harmonic signal frequency multipliers, their main disadvantages and applications are described. A new principle of multiplication of frequency of the sinusoidal voltage is proposed, based on the regulation of input signal phase within 360° by a phase shifter controlled by an alternating sawtooth voltage with amplitude equal to input signal amplitude. The development and research of frequency multipliers implementing the proposed principle was carried out by methods of structural design and mathematical modeling. The results of the development of harmonic frequency doubler and tripler, which have stronger performance than known ones and operate on the basis of the proposed principle, are presented. Their structural schemes are provided. Simulation models of the frequency multipliers under consideration were compiled in the Matlab & Simulink environment and oscillograms of their operation were obtained, confirming their operability and the correctness of the choice of technical solutions. A controlled frequency multiplier has been developed, having a high speed, a low level of side harmonics, a wide range of operating frequencies and an adjustable multiplication factor, including its fractional values. It was demonstrated that the multiplication factor of the developed harmonic signal frequency multipliers can reach several tens.

Keywords: frequency multiplier, controlled phase shifter, comparator, single shot, integrator with reset, multiplier, counting trigger, controlled amplifier

For citation: Kolesnikov E. B. Harmonic signal frequency multipliers on controlled phase shifter. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 52–64. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-52-64. – EDN: RKKOXV.

Введение. Умножители частоты [1] применяются при создании высокочастотных источников гармонических сигналов с высокой стабильностью частоты в радиопередатчиках и приемниках, синтезаторах частот, высокочастотных генераторах для индукционных печей, а также в ряде измерительных устройств, когда требуется получить сетку частот, кратных какой-либо одной определенной частоте, рассматриваемой в качестве опорной. Применение умножителей частоты позволяет получать стабильные колебания высокой частоты при относительно низкой частоте выходного сигнала задающего генератора. Необходимость в использовании умножителей частоты возникает при

ограниченном диапазоне частот задающих генераторов с кварцевой стабилизацией вследствие небольшой механической прочности кварцевого резонатора. На практике для повышения частоты обычно применяются удвоители и реже – утроители частоты, так как большие коэффициенты умножения снижают эффективность и точность умножителей по ряду причин [2]. Более высокие коэффициенты умножения достигаются путем последовательного (каскадного) соединения умножителей.

Умножители частоты можно классифицировать по принципу действия и типу нелинейного элемента. По принципу действия умножители подразделяются на два вида: с применением нелинейного элемента, искажающего форму входного гармонического сигнала, и последующим выделением из полученного широкополосного спектра требуемой гармоники; с основанным на синхронизации частоты управляемого автогенератора внешним низкочастотным сигналом, в n раз меньшим по частоте, с использованием делителя частоты. В умножителях частоты первого вида в качестве нелинейного элемента применяются электронные лампы, транзисторы и диоды. В умножителях частоты второго вида используется система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с делителем частоты в цепи обратной связи. В качестве основных параметров умножителей частоты можно выделить: коэффициент умножения по частоте n; выходную мощность k-й гармоники; входную мощность основной гармоники; коэффициент преобразования; КПД; уровень подавления побочных составляющих [3].

Анализ литературных источников. Умножители частоты достаточно широко освещены в литературе. Так, в работах [3, 4] приведены схемы умножителей частоты, где в качестве нелинейного элемента используется варикап. Такие умножители частоты являются пассивными и имеют достаточно простые схемы. Однако умножители частоты на варикапах характеризуются невысокой выходной мощностью, низким КПД и высоким уровнем побочных гармоник. Применение в схемах умножителей частоты варактора [5] позволяет несколько повысить выходную мощность и КПД, но не подавляет полностью побочные гармоники. Варакторные умножители частоты используют для двух- или трехкратного умножения частоты. Применение в умножителях частоты транзисторов [4–11], работающих в режиме отсечки, повышает выходную мощность и КПД, а также генерирует широкий спектр гармонических составляющих, который изменяется и зависит от угла отсечки. Но дальнейшее применение узкополосного фильтра не позволяет полностью избавиться от побочных гармоник. Улучшенные показатели имеют резонансные усилители [2, 12]. Однако коэффициент умножения транзисторных умножителей частоты не превышает 3–4 раз при КПД, равном 10–20 %. Задание требуемого оптимального угла отсечки для более высоких коэффициентов умножения приводит к уменьшению амплитуды выходных импульсов и к получению колебаний с очень малой амплитудой.

Задачу умножения частоты можно реализовать на транзисторах, включенных по двухтактной схеме [13]. При этом, поскольку два транзистора работают на общую для них нагрузку, в этой нагрузке за один период частоты поступающего на каскад сигнала возникают два периода удвоенной частоты. Такая схема позволяет получать на выходе достаточно мощный сигнал, однако область ее применения ограничивается получением на выходе сигналов только четных гармоник. Схемы умножителей частоты, основанные на применении двухполупериодного выпрямления [13, 14], характеризуются простотой построения и высокой широкополосностью. Однако приемлемые показатели преобразования в них можно получить только для коэффициента преобразования, равного двум. Такие умножители частоты имеют низкий КПД из-за использования в схемах широкополосных трансформаторов и высокий уровень побочных гармоник.

Удвоение частоты можно получить путем использования квадратора [5]. Преимуществом такого способа удвоения частоты является возможность работы в широком диапазоне частот, вплоть до чрезвычайно низких, так как схема не содержит колебательных контуров. При применении квадратора не требуется постоянной составляющей, появляющейся в выходном сигнале. Это обеспечивается путем введения в устройство фильтра верхних частот. Однако его введение приводит к ограничению полосы пропускания умножителя в области нижних частот из-за значительного времени переходного процесса, а значит, к уменьшению быстродействия. Кроме того, область применения квадратора в качестве умножителя ограничивается только удвоением частоты.

Умножители частоты на основе ФАПЧ представляют собой систему, состоящую из генератора, управляемого напряжением, делителя частоты, фазового детектора и фильтра нижних частот [15–18]. Применение ФАПЧ позволяет создать умножители частоты с различными коэффициентами умножения путем введения в цепь обратной связи соответствующих делителей частоты. Однако такие умножители частоты имеют низкое быстродействие в переходных режимах, обусловленное режимом захвата и наличием фильтра нижних частот, и ограниченный диапазон частот генератора, управляемого напряжением. Кроме того, в схемах с ФАПЧ, используемых для умножения, к выходному сигналу добавляются еще и боковые полосы фазовой модуляции. Фазовые изменения и фазовая модуляция вызывают явление, которое называется шумом генератора. Также использование ФАПЧ предполагает применение генератора, управляемого напряжением, с синусоидальным выходным напряжением.

Таким образом, можно отметить следующие недостатки рассмотренных умножителей частоты: низкий коэффициент умножения $n = 2, 3$, реже – более; высокий уровень побочных гармоник; низкий КПД; низкий коэффициент передачи; невысокое быстродействие, связанное с применением фильтров; невозможность плавного регулирования коэффициента умножения n и получения его дробных значений.

Разработка и исследование умножителей частоты. В основу работы предлагаемых умножителей частоты гармонического сигнала положен новый принцип умножения частоты синусоидального сигнала, основанный на управлении управляемым фазовращателем нарастающим переменным напряжением пилообразной формы амплитудой равной амплитуде входного сигнала. В рассматриваемых умножителях применен управляемый фазовращатель, который линейно изменяет фазу φ входного синусоидального сигнала от –180 до +180° при изменении управляющего напряжения от –10 до +10 В [19].

Принцип работы разработанных умножителей частоты рассмотрим на примере удвоителя частоты гармонического сигнала [20], структурная схема которого приведена на рис. 1. Удвоитель частоты содержит управляемый фазовращатель, компаратор и одновибратор, входящие в формирователь импульсов сброса, интегратор со сбросом, источник опорного напряжения, источник напряжения смещения, сумматор и усилитель. Для подтверждения работоспособности и исследования удвоителя частоты составлена модель в пакете прикладных программ Matlab & Simulink (рис. 2). Осциллограммы, полученные в результате моделирования удвоителя частоты, приведены на рис. 3.

Работа удвоителя частоты заключается в следующем (см. рис. 2). Входное синусоидальное напряжение $u_{вх} = U_{mвх}\sin\omega t$ с частотой $\omega = 2\pi f$ подается на входы управляемого фазовращателя и компаратора, который преобразует входное синусоидальное напряжение $u_{вх} = U_{mвх}\sin\omega t$ в напряжение u_1 прямоугольной формы. Одновибратор формирует узкие импульсы по фронту напряжения u_1, которые подаются на вход

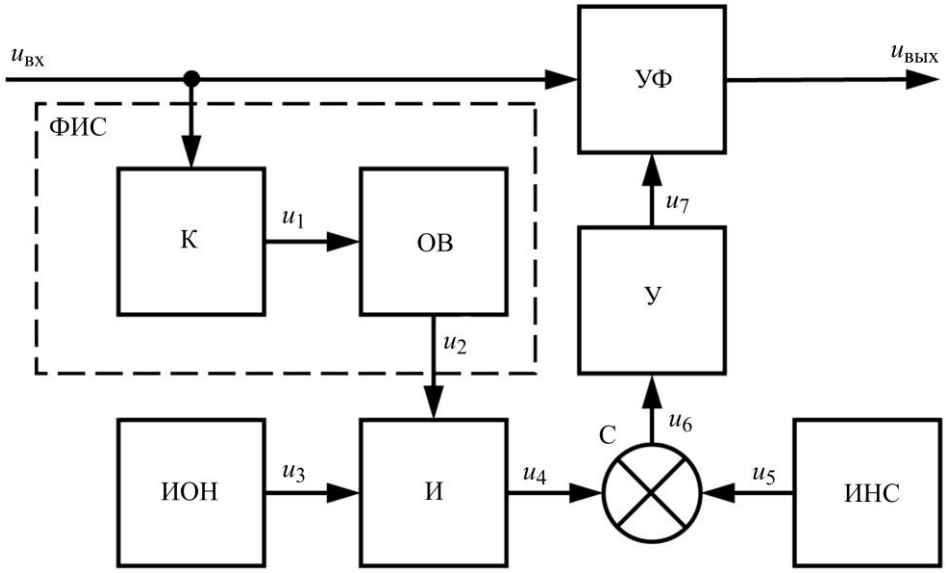


Рис. 1. Структурная схема удвоителя частоты: ФИС – формирователь импульсов сброса; К – компаратор; ОВ – одновибратор; ИОН – источник опорного напряжения; И – интегратор со сбросом; УФ – управляемый фазовращатель; У – усилитель; С – сумматор; ИНС – источник напряжения смещения

Fig. 1. Block diagram of the frequency doubler: ФИС – reset pulse generator; К – comparator; ОВ – single-vibrator; ИОН – reference voltage source; И – integrator with reset; УФ – controlled phase shifter; У – amplifier; С – adder; ИНС – bias voltage source

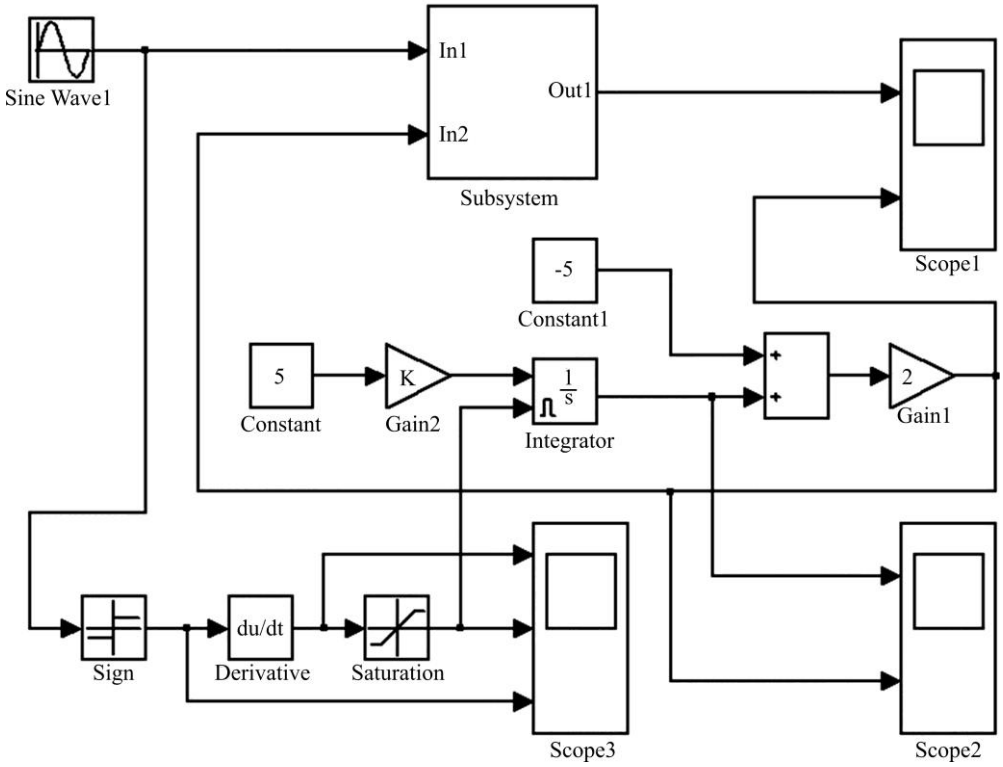


Рис. 2. Структурная схема модели удвоителя частоты

Fig. 2. Block diagram of the frequency doubler model

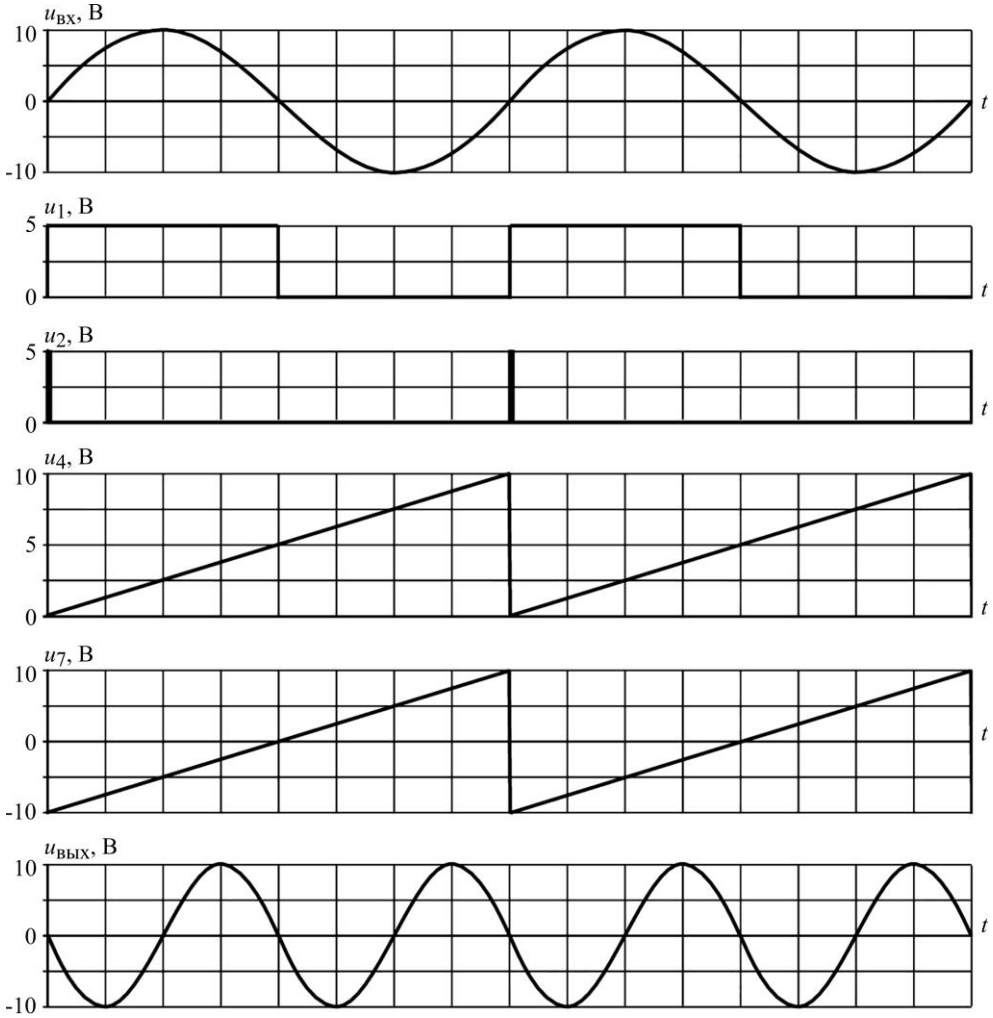


Рис. 3. Осциллограммы работы удвоителя частоты
Fig. 3. Oscillograms of the frequency doubler operation

сброса интегратора. При этом на его вход подается напряжение постоянного тока u_3 от источника опорного напряжения. На выходе интегратора формируется нарастающее пилообразное напряжение u_4 положительной полярности с частотой $f_{вх}$ входного напряжения $u_{вх}$, амплитуда которого U_{4m} определяется по формуле:

$$U_{4m} = \frac{1}{RC}\int u_3 dt = \frac{U_3 t}{RC} = \frac{U_3 T}{RC} = \frac{U_3}{RCf_{вх}},$$

где R – сопротивление резистора интегратора; C – емкость конденсатора интегратора; T – период входного напряжения $u_{вх}$; $f_{вх}$ – частота входного напряжения $u_{вх}$.

Для выбора параметров времязадающих элементов R и C схемы интегратора необходимо выдержать следующее соотношение:

$$RC = \frac{U_3}{U_{4m} f_{вх}}.$$

Для амплитуды выходного пилообразного напряжения интегратора U_{4m} = 10 В и выходного напряжения U_3 = 5 В источника опорного напряжения соотношение параметров интегратора будет следующее:

$$RC = \frac{U_3}{U_{4m} f_{\text{вх}}} = \frac{5}{10 f_{\text{вх}}} = \frac{0{,}5}{f_{\text{вх}}}.$$

Выходное напряжение u_4 интегратора суммируется в сумматоре с опорным напряжением $u_5 = U_{\text{оп}} = -5$ В от источника напряжения смещения, в результате чего на выходе сумматора формируется переменное пилообразное напряжение u_6 амплитудой U_{6m} = 5 В. Это напряжение усиливается в два раза усилителем, в итоге на его выходе и на управляющем входе управляемого фазовращателя формируется переменное пилообразное напряжение u_7 амплитудой U_{7m} = 10 В. Это напряжение, воздействуя на управляемый фазовращатель, изменяет фазу φ его входного сигнала от –180 до +180° с частотой $f_{\text{вх}}$ входного напряжения $u_{\text{вх}}$. В результате на выходе управляемого фазовращателя и на выходе удвоителя частоты в соответствии с известными тригонометрическими тождествами формируется выходное напряжение $u_{\text{вых}}$:

$$u_{\text{вых}} = U_{m\text{вх}} \sin(\omega t + \varphi) = U_{m\text{вх}} [\sin\omega t \cdot \cos(\omega t - 180^\circ) + \sin(\omega t - 180^\circ)\cos\omega t] =$$

$$= U_{m\text{вх}} \left[\frac{\sin(\omega t - \omega t + 180^\circ) + \sin(\omega t + \omega t - 180^\circ)}{2} + \frac{\sin(\omega t - 180^\circ - \omega t) + \sin(\omega t - 180^\circ + \omega t)}{2} \right] =$$

$$= U_{m\text{вх}} \left[\frac{\sin(\omega t + \omega t - 180^\circ)}{2} + \frac{\sin(\omega t - 180^\circ + \omega t)}{2} \right] = U_{m\text{вх}} \sin(2\omega t - 180^\circ).$$

Из полученного выражения и временных диаграмм (см. рис. 3) видно, что частота выходного напряжения $u_{\text{вых}}$ удвоителя частоты равна 2ω, т. е. имеет место удвоение частоты ω входного напряжения $u_{\text{вх}}$. При этом амплитуда выходного напряжения $u_{\text{вых}}$ умножителя частоты равна амплитуде $U_{m\,\text{вх}}$ входного напряжения $u_{\text{вх}}$.

Умножители частоты с более высоким коэффициентом умножения частоты n можно получить путем повышения частоты импульсов сброса интегратора в формирователе импульсов сброса. Так, в утроителе частоты используется формирователь импульсов сброса, представляющий собой детектор перехода входного напряжения $u_{\text{вх}}$ через ноль – детектор нуля [21]. При этом частота импульсов сброса интегратора в два раза выше частоты входного напряжения $u_{\text{вх}}$ и равна 2ω. В результате на выходе управляемого фазовращателя и на выходе утроителя частоты формируется выходное напряжение, равное:

$$u_{\text{вых}} = U_{m\text{вх}} \sin(\omega t + \varphi) = U_{m\text{вх}} \sin(\omega t + 2\omega t - 180^\circ) = U_{m\text{вх}} \sin(3\omega t - 180^\circ).$$

Из полученного выражения видно, что частота выходного напряжения утроителя равна 3ω, т. е. имеет место утроение частоты ω входного сигнала $u_{\text{вх}}$. Дальнейшее повышение коэффициента умножения частоты n осуществляется каскадным соединением рассмотренных умножителей частоты.

Нижняя граница рабочей частоты рассматриваемых умножителей частоты определяется из расчета допустимой линейности пилообразного напряжения интегратора. Верхняя граница частотного диапазона умножителей частоты определяется максимальной рабочей частотой тех компонентов, на которых они выполнены. Это в основном высокочастотные операционные усилители, частота единичного усиления которых может достигать нескольких сотен мегагерц [22]. Однако бóльшее влияние на верхнюю

границу частотного диапазона оказывает длительность процесса сброса интегратора, заключающаяся в разряде конденсатора интегратора, который не может быть мгновенным. Поэтому длительность процесса сброса на высоких частотах становится соизмеримой с периодом пилообразного напряжения. В результате частотный диапазон таких умножителей частоты ограничен сверху частотой не более 10 МГц. Кроме того, приведенные умножители частоты не позволяют регулировать значение коэффициента умножения n и получать его дробные значения.

Частотный диапазон рассматриваемых умножителей частоты расширен в сторону высших частот путем усложнения схемы формирования пилообразного напряжения: вместо интегратора со сбросом применен обычный интегратор, для регулирования коэффициента умножения n в схему удвоителя частоты умножителей частоты (см. рис. 1) введен управляемый генератор импульсов, который позволяет регулировать частоту пилообразного напряжения под действием внешнего напряжения управления U_y. Структурная схема полученного умножителя показана на рис. 4 [23]. Схема содержит управляемый фазовращатель, управляемый генератор, счетный триггер, сумматор, источник напряжения смещения, усилитель-ограничитель, перемножитель, интегратор и управляемый усилитель. Осциллограммы полученного управляемого умножителя частоты изображены на рис. 5.

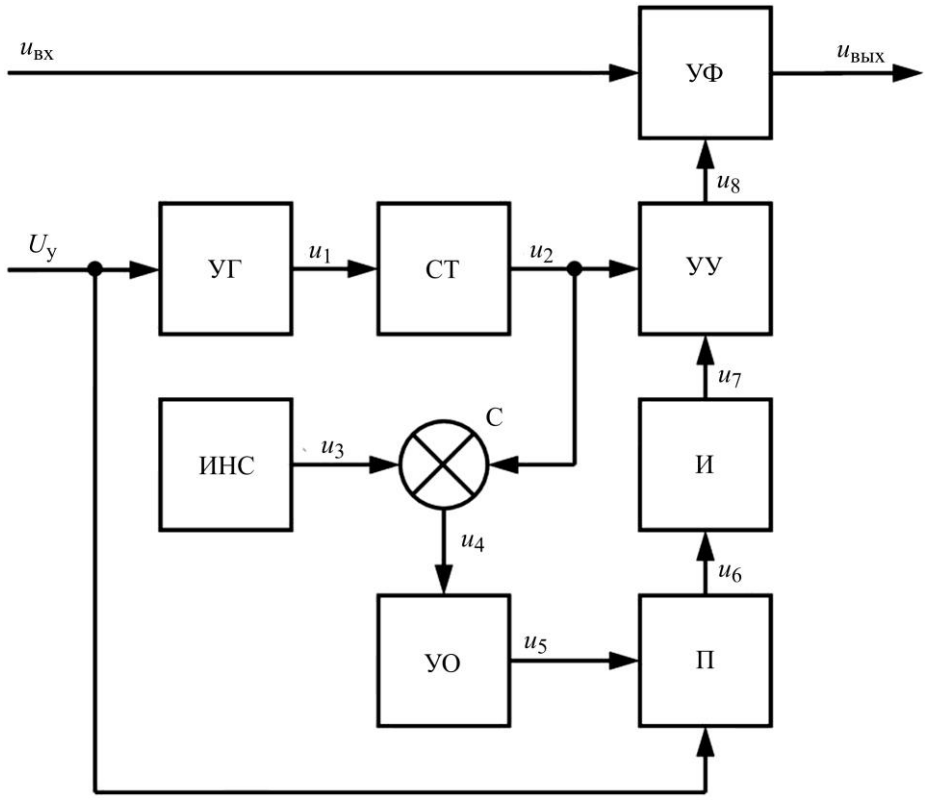


Рис. 4. Структурная схема управляемого умножителя частоты с применением управляемого усилителя: УГ – управляемый генератор; СТ – счетный триггер; УО – усилитель-ограничитель; УУ – управляемый усилитель; П – перемножитель

Fig. 4. Block diagram of a controlled frequency multiplier with the use of controlled amplifier: УГ – controlled oscillator; СТ – counting trigger; УО – limiter amplifier; УУ – controlled amplifier; П – multiplier

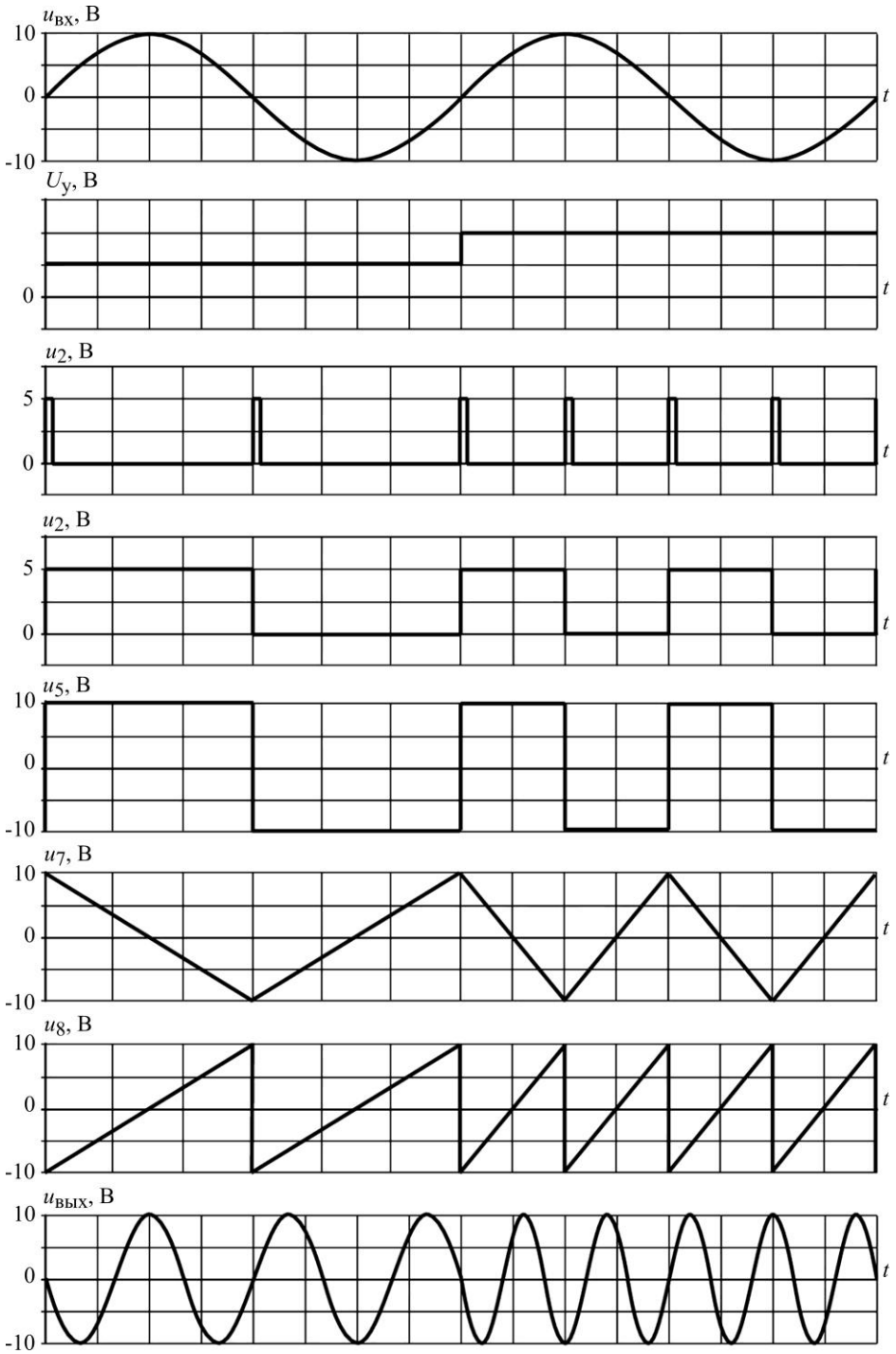


Рис. 5. Осциллограммы управляемого умножителя частоты с применением управляемого усилителя

Fig. 5. Oscillograms of a controlled frequency multiplier using a controlled amplifier

Коэффициент передачи управляемого генератора $K_{УГ}$ выбирают таким образом, чтобы при напряжении $U_у$ = 10 В частота его выходных импульсов соответствовала максимальной его рабочей частоте $f_{УГ\,max}$, т. е. $K_{УГ} = f_{УГ\,max}/10$. Выходные импульсы u_1 управляемого генератора подаются на вход счетного триггера, который срабатывает по их фронту и делит частоту его входного напряжения u_1 на два, и на его выходе формируется напряжение u_2 прямоугольной формы с частотой $f_{УГ}/2$ (см. рис. 5). В сумматоре

напряжение u_2 суммируется с отрицательным напряжением u_3 от источника напряжения смещения, значение которого равно примерно половине амплитуды u_2. В результате на выходе сумматора формируется переменное напряжение u_4 прямоугольной формы с частотой $f_{УГ}/2$ и амплитудой, близкой к 2,5 В, которое поступает на вход усилителя-ограничителя, формирующего на своем выходе переменное напряжение u_5 прямоугольной формы с фиксированным значением амплитуды, равным ± 10 В. Это напряжение поступает на первый вход перемножителя, на второй вход которого поступает напряжение управления $U_у$. При этом на входе интегратора формируется напряжение u_5, равное результату перемножения в перемножителе напряжений $U_у$ и U_5:

$$U_{6m} = K_п U_у U_{5m} = 0{,}1 \cdot U_у \cdot 10 = U_у,$$

где $K_п = 0{,}1$ – коэффициент передачи перемножителя; $U_{5m} = 10$ В – амплитуда выходного напряжения усилителя-ограничителя.

Интегратор преобразует входное напряжение u_6 прямоугольной формы в переменное напряжения треугольной формы, амплитуда которого определяется выражением

$$U_{7m} = \frac{1}{RC}\int u_6 dt = \frac{U_{6m} 2T}{4RC} = \frac{U_{6m}}{2RCf_{УГ}} = \frac{U_у}{2RCK_{УГ}U_у} =$$

$$= \frac{1}{2RC(f_{УГ\max}/10)} = \frac{5}{RCf_{УГ\max}},$$

где $T = 1/f$ – период выходного напряжения управляемого генератора; U_{7m} – амплитуда выходного напряжения интегратора; $f_{УГ}$ – частота выходного напряжения управляемого генератора; $f_{УГmax}$ – максимальная частота выходного напряжения управляемого генератора.

Таким образом, амплитуда выходного напряжения U_{7m} интегратора не зависит от напряжения управления $U_у$ во всем рабочем диапазоне частот умножителя.

Для выбора параметров времязадающих элементов схемы R и C при амплитуде выходного напряжения интегратора, равной $U_{7m} = 10$ В, необходимо выдержать следующее соотношение:

$$\frac{5}{RCf_{УГ\max}} = 10 \text{ или } RC = \frac{1}{2f_{УГ\max}}.$$

Выходное напряжение u_7 интегратора треугольной формы с частотой $f_{УГ}/2$ подается на вход управляемого усилителя, на управляющий вход которого подается напряжение u_2 прямоугольной формы с выхода счетного триггера. Это напряжение приводит к переключению полярности выходного напряжения u_8 управляемого усилителя. Отметим, что положительное напряжение u_2 приводит к изменению полярности выходного напряжения u_7 интегратора на противоположную, а нулевое напряжение не изменяет полярность напряжения u_7. Коэффициент передачи управляемого усилителя выбран равным единице, поэтому в первый полупериод выходного напряжения u_2 счетного триггера он работает как инвертор, а во второй – как повторитель (см. рис. 5). В результате на выходе управляемого усилителя формируется переменное нарастающее пилообразное напряжение u_8 частотой $f_{УГ}$ и амплитудой $U_{8m} = 10$ В, которая не зависит от напряжения управления $U_у$ во всем его рабочем диапазоне. Это напряжение u_8 подается на управляющий вход управляемого фазовращателя. Пилообразное управляющее напряжение u_8 амплитудой $U_{8m} = 10$ В, воздействуя на управляемый усилитель, изменяет фазу φ его входного сигнала от –180 до +180° (см. рис. 5). В результате на выходе

управляемого фазовращателя и на выходе умножителя частоты формируется выходное напряжение $u_{\text{вых}}$:

$$u_{\text{вых}} = U_{m\text{вх}}\sin(\omega_{\text{вх}}t+\varphi) = U_{m\text{вх}}\sin(\omega_{\text{вх}}t+\omega_{\text{УГ}}t-180^{\text{o}}) =$$

$$= U_{m\text{вх}}\sin(\omega_{\text{вх}}t+U_{\text{у}}2\pi K_{\text{УГ}}t-180^{\text{o}}) = U_{m\text{вх}}\sin(\omega_{\text{вх}}t+U_{\text{у}}\frac{\omega_{\text{УГ max}}}{10}t-180^{\text{o}}) =$$

$$= -U_{m\text{вх}}\sin(\omega_{\text{вх}}t+U_{\text{у}}\frac{\omega_{\text{УГ max}}}{10}t) = -U_{m\text{вх}}\sin[n\omega_{\text{вх}}t),$$

где $n = \frac{f_{\text{вых}}}{f_{\text{вх}}} = \frac{\omega_{\text{вых}}}{\omega_{\text{вх}}} = 1+U_{\text{у}}\frac{\omega_{\text{УГ max}}}{10\omega_{\text{вх}}} = 1+U_{\text{у}}\frac{K_{\text{с}}}{10}$ – коэффициент умножения;

$K_{\text{с}} = \frac{f_{\text{УГ max}}}{f_{\text{вх}}} = \frac{\omega_{\text{УГ max}}}{\omega_{\text{вх}}}$ – коэффициент соотношения частот.

Из полученного выражения видно, что частота $\omega_{\text{вых}}$ выходного напряжения $u_{\text{вых}}$ умножителя частоты зависит от коэффициента умножения n, зависящего, в свою очередь, от напряжения управления $U_{\text{у}}$, изменяя которое, можно плавно изменять значения коэффициента умножения n. При этом амплитуда выходного напряжения $U_{m\text{ вых}}$ умножителя частоты остается равной амплитуде входного напряжения $U_{m\text{ вх}}$. Зависимость коэффициента умножения n от напряжения управления $U_{\text{у}}$ является регулировочной характеристикой $n = f(U_{\text{у}})$, которая представляет собой линейную зависимость. Схема позволила устранить процесс сброса, в результате чего полоса частот расширилась до нескольких десятков-сотен мегагерц.

Таким образом, предложенный управляемый умножитель частоты гармонического сигнала позволяет получать регулируемый коэффициент умножения частоты n, включая дробные его значения. В зависимости от частоты входного сигнала коэффициент умножения частоты n может достигать нескольких десятков. Следует отметить, что в данном умножителе частоты применен импульсный управляемый генератор, который намного проще синусоидального, используемого в умножителе частоты с ФАПЧ. Расширить полосу пропускания умножителя частоты также можно, применив, например, прецизионный генератор пилообразного напряжения на основе цифрового интегратора [24].

Заключение. Предложенный принцип умножения частоты синусоидального напряжения основан на управлении управляемым фазовращателем нарастающим переменным напряжением пилообразной формы амплитудой, равной амплитуде входного сигнала. Разработанные гармонические удвоитель и утроитель частоты имеют более высокие показатели, чем известные, и работают на основе предложенного принципа. Результаты моделирования подтвердили их работоспособность и правильность выбора технических решений разработанных умножителей частоты. Благодаря использованию в полученных схемах умножителей высокочастотных активных компонентов, отсутствию различных фильтров и систем подстройки частоты, разработанные умножители частоты по сравнению с известными аналогами имеют более высокое быстродействие и КПД, низкий уровень побочных гармоник, широкий диапазон рабочих частот, а также регулируемый коэффициент умножения, включая его дробные значения.

Литература

1. ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 1982. 37 с.

2. ***Дахнович А. А.*** Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. 176 с.

3. ***Ризкин И. Х.*** Умножители и делители частоты. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Связь, 1976. 327 с.

4. ***Бруевич А. Н.*** Умножители частоты. М.: Сов. радио, 1970. 247 с.

5. ***Каяцкас А. А.*** Основы радиоэлектроники: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 464 с.

6. ***Мельник Ю. А., Стогов Г. В.*** Основы радиотехники и радиотехнические устройства. М.: Сов. радио, 1973. 367 с.

7. ***Доброневский О. В.*** Справочник по радиоэлектронике. 3-е изд., перераб. и доп. Киев: Вища школа, 1978. 359 с.

8. ***Гоноровский И. С.*** Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

9. ***Ефимчик М. К., Шушкевич С. С.*** Основы радиоэлектроники. 2-е изд., перераб. и доп. Минск: Университетское, 1986. 303 с.

10. ***Махов М. Е.*** Умножитель частоты на полевых транзисторах // Радиотехника. 1974. Т. 29. № 9. С. 96–97.

11. ***Землянухин П. А.*** Исследование характеристик умножителя частоты гармонических колебаний на базе ограничителя напряжения // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2017. № 5 (190). С. 90–102. https://doi.org/10.23683/2311-3103-2017-5-90-102. – EDN: ZHRHTT.

12. ***Баскаков С. И.*** Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2000. 462 с.

13. ***Горошков Б. И.*** Радиоэлектронные устройства: справочник. М.: Радио и связь, 1984. 400 с.

14. ***Сумин А. М., Мушта А. И.*** Методика проектирования СФ блока преобразователя частоты в субмикронном технологическом базисе на основе синтезированных нелинейных реактивных элементов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 10. С. 74–81. EDN: OIOCZV.

15. ***Гальперин М. В.*** Практическая схемотехника в промышленной автоматике. М.: Энергоатомиздат, 1987. 320 с.

16. ***Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А.*** Системы фазовой автоподстройки частоты. 2-е изд., доп. М.: Связь, 1972. 447 с.

17. ***Хоровиц П., Хилл У.*** Искусство схемотехники / пер. с англ. Б. Н. Бронина. 7-е изд. М.: Бином, 2014. 704 с.

18. ***Левин В. А., Малиновский В. Н., Романов С. К.*** Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. М.: Радио и связь, 1989. 231 с.

19. Пат. 206198 РФ. Управляемый фазовращатель / ***Е. Б. Колесников***; заявл. 11.05.2021; опубл. 30.08.2021, Бюл. № 25. 6 с. EDN: EZDQNC.

20. Пат. 206321 РФ. Гармонический удвоитель частоты / ***Е. Б. Колесников***; заявл. 24.05.2021; опубл. 06.09.2021, Бюл. № 25. 8 с. EDN: KZARTT.

21. Пат. 206703 РФ. Утроитель частоты / ***Е. Б. Колесников***; заявл. 18.05.2021; опубл. 23.09.2021, Бюл. № 27. 8 с. EDN: NCPTQV.

22. ***Турута Е. Ф.*** Операционные усилители: справочник. М.: Патриот, 1996. 232 с.

23. Пат. 212993 РФ. Управляемый гармонический умножитель частоты / ***Е. Б. Колесников***; заявл. 31.05.2022; опубл. 17.08.2022, Бюл. № 23. 9 с. EDN: ANYGVA.

24. ***Johnson N.*** Ramp generator // Everyday and Practical Electronics. 1995. No. 7. P. 546–550.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 19.06.2023 г.;
принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторе

Колесников Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Новомосковского института (филиала) Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева (Россия, 301665, г. Новомосковск, ул. Дружбы, 8), kolesnikov55@mail.ru

References

1. GOST 24375–80. *Radio communication. Terms and definitions.* Moscow, Standartinform Publ., 1982. 37 p. (In Russian).

2. Dakhnovich A. A. *Radio circuits and signals,* study guide. Tambov, Tambov State Univ. Publ., 2009. 176 p. (In Russian).

3. Rizkin I. Kh. *Frequency multipliers and dividers.* 2nd ed., upd. and rev. Moscow, Svyaz Publ., 1976. 327 p. (In Russian).

4. Bruevich A. N. *Frequency multipliers.* Moscow, Sov. radio Publ., 1970. 247 p. (In Russian).

5. Kayatskas A. A. *Basics of radio electronics,* study guide for universities. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 464 p. (In Russian).

6. Mel'nik Yu. A., Stogov G. V. *Basics of radio engineering and radio engineering devices.* Moscow, Sov. radio Publ., 1973. 367 p. (In Russian).

7. Dobronevskiy O. V. *Information book on radio electronics.* 3rd ed., rev. and upd. Kyiv: Vishcha shkola Publ., 1978. 359 p. (In Russian).

8. Gonorovskiy I. S. *Radio circuits and signals,* textbook for universities. 4th ed., rev. and upd. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 512 p. (In Russian).

9. Efimchik M. K., Shushkevich S. S. *Basics of radio electronics.* 2nd ed., rev. and upd. Minsk, Universitetskoye Publ., 1986. 303 p. (In Russian).

10. Makhov M. E. Frequency multiplier on field transistors. *Radiotekhnika = Radioengineering,* 1974, vol. 29, no. 9, pp. 96–97. (In Russian).

11. Zemlyanukhin P. A. On capabilities of the frequency multiplier of harmonic oscillations on the basis of the voltage limiter. *Izv. YuFU. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences,* 2017, no. 5 (190), pp. 90–102. https://doi.org/10.23683/2311-3103-2017-5-90-102. – EDN: ZHRHTT.

12. Baskakov S. I. *Radio circuits and signals,* textbook for universities. 3rd ed., rev. and upd. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 462 p. (In Russian).

13. Goroshkov B. I. *Radioelectronic devices,* information book. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 400 p. (In Russian).

14. Sumin A. M., Mushta A. I. The technique of designing IP block of the frequency multiplier in submicronic technological basis in terms of synthesized nonlinear jet elements. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University,* 2011, vol. 7, no. 10, pp. 74–81. (In Russian). EDN: OIOCZV.

15. Gal'perin M. V. *Practical circuit design in industrial automation.* Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 320 p. (In Russian).

16. Shakhgil'dyan V. V., Lyakhovkin A. A. *Phase-locked loop frequency control systems.* 2nd ed., upd. Moscow, Svyaz Publ., 1972. 447 p. (In Russian).

17. Horowitz P., Hill W. *The art of electronics.* 2nd ed., rev. and upd. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1989. 1125 p.

18. Levin V. A., Malinovskiy V. N., Romanov S. K. *Frequency synthesizers with pulse-phase automatic control system.* Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 231 p. (In Russian).

19. Kolesnikov E. B. *Controllable phase shifter.* Pat. 206198 RF, publ. 30.08.2021, Bul. no. 25. 6 p. (In Russian). EDN: EZDQNC.

20. Kolesnikov E. B. *Harmonic frequency doubler.* Pat. 206321 RF, publ. 06.09.2021, Bul. no. 25. 8 p. (In Russian). EDN: KZARTT.

21. Kolesnikov E. B. *Frequency tripler.* Pat. 206703 RF, publ. 23.09.2021, Bul. no. 27. 8 p. (In Russian). EDN: NCPTQV.

22. Turuta E. F. *Operational amplifiers,* information book. Moscow, Patriot Publ., 1996. 232 p. (In Russian).

23. Kolesnikov E. B. *Controlled harmonic frequency multiplier.* Pat. 212993 RF, publ. 17.08.2022, Bul. no. 23. 9 p. (In Russian). EDN: ANYGVA.

24. Johnson N. Ramp generator. *Everyday and Practical Electronics,* 1995, no. 7, pp. 546–550.

The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 19.06.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the author

Evgeny B. Kolesnikov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Power Supply of Industrial Enterprises Department, Novomoskovskiy Institute (branch) D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia (Russia, 301665, Novomoskovsk, Druzhba st., 8), kolesnikov55@mail.ru

Научная статья
УДК 621.382.323.049.77: 536.48
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-65-78
EDN: QXXHKC

Моделирование электротепловых переходных процессов в мощных электронных схемах на печатных платах с использованием программного обеспечения Comsol, Spice, «Асоника-ТМ»

***К. О. Петросянц*[1,2], *И. А. Харитонов*[1], *М. С. Тегин*[3]**

[1]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия*
[2]*Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия*
[3]*ООО «Компекс-Т», г. Москва, Россия*

kpetrosyants@hse.ru

Аннотация. Большие скачки температуры в структурах мощных полупроводниковых приборов при их включении и выключении существенно снижают надежность работы силовых схем. Широко используемые маршруты электротеплового моделирования тепловых схем имеют ряд недостатков: использование взаимосвязанных Spice-симуляторов электрических цепей и пакета 3D численного моделирования тепловых полей требует детального описания 3D-конструкций и больших затрат компьютерного времени; использование только Spice-подобных симуляторов электрических цепей для смешанного электротеплового моделирования требует создания электротепловых моделей силовых компонентов и значительных затрат процессорного времени из-за большой разницы в постоянных времени электрической и тепловой частей. В работе предложена и реализована усовершенствованная схема многоуровневого автоматизированного электротеплового моделирования мощных электронных компонентов с использованием программного обеспечения Comsol на уровне полупроводниковых приборов, Spice-моделирования на уровне принципиальных схем и системы «Асоника-ТМ» на уровне печатных плат. Описаны разработанные дополнительные программные средства для реализации предложенного маршрута, обеспечивающие автоматизацию процессов расчета мощностей компонентов мощных схем, передачи этих значений в пакет теплового моделирования и формирования электротепловых моделей компонентов схем. Корректность рассматриваемой схемы моделирования подтверждена результатами тепловизионного анализа с помощью инфракрасной камеры. Эффективность предложенной методологии продемонстрирована на примере реальной конструкции печатной платы силовой схемы, содержащей мощные МОП-транзисторы, для управления мощным шаговым двигателем. В анализируемой схеме выявлен возможный тепловой отказ выходных ДМОП-транзисторов вследствие их перегрева. Для улучшения условий снижения значений их температуры предложено использовать более крупный радиатор с меньшим тепловым сопротивлением.

© К. О. Петросянц, И. А. Харитонов, М. С. Тегин, 2024

Ключевые слова: мощные компоненты, силовая схема, МОП-транзистор, печатная плата, Spice-симулятор, электротепловое моделирование, тепловые схемы, ИК-измерения

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

Для цитирования: Петросянц К. О., Харитонов И. А., Тегин М. С. Моделирование электротепловых переходных процессов в мощных электронных схемах на печатных платах с использованием программного обеспечения Comsol, Spice, «Асоника-ТМ» // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 65–78. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-65-78. – EDN: QXXHKC.

Original article

Simulation of electro-thermal transient responses in power PCB modules using Comsol, Spice, Asonika-TM

K. O. Petrosyants[1,2], I. A. Kharitonov[1], M. S. Tegin[3]

[1]National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
[2]Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3]LLC "Kompex-T", Moscow, Russia

kpetrosyants@hse.ru

Abstract. Large temperature jumps in the structures of power semiconductor devices occurring when they are turned on and off significantly reduce the reliability of power circuits. Widely used electro-thermal modeling approaches for thermal circuits have a number of disadvantages: the use of interconnected Spice simulators and numerical 3D thermal field modeling tool requires a detailed description of 3D structures and a large computer time; the use of only Spice-like simulators of electrical circuits for mixed electro-thermal modeling require the creation of electro-thermal models of power components and significant CPU time costs due to the large difference in the time constants of the electrical and thermal parts. In this work, an improved scheme of multilevel automated electro-thermal modeling and simulation of power electronic components using Comsol software at the semiconductor device level, Spice simulation at the circuit level and Asonika-TM system at the printed circuit board (PCB) level is proposed and implemented. The developed additional software tools for the implementation of the proposed route are described, providing automation of power calculation processes in capacities of components of powerful circuits, components, of obtained values transferring to a thermal simulation tool and of forming electro-thermal models of circuit components. The correctness of the proposed modeling scheme was confirmed by the results of thermal-imaging analysis using an IR camera. The effectiveness of the proposed methodology was demonstrated through the example of a real PCB design with high-power MOSFETs for power stepper motor driving. In the analyzed circuit, a possible

thermal failure of the output DMOSFETs due to their overheating was revealed. To improve conditions of their temperature value lowering it has been proposed to use larger electrode radiator with lesser thermal resistance.

Keywords: high-power component, power circuit, MOSFET, PCB, Spice simulator, electro-thermal modeling, thermal sub-circuit, IR measurements

Funding: the work has been supported by the "Priority 2030" Program within the framework of the HSE strategic project "Digital Transformation: Technology, Effects, Efficiency" (project no. 23-22-00313).

For citation: Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Tegin M. S. Simulation of electro-thermal transient responses in power PCB modules using Comsol, Spice, Asonika-TM. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 65–78. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-65-78. – EDN: QXXHKC.

Введение. Одна из основных причин выхода из строя силовых компонентов в мощных схемах на печатных платах, предназначенных для управления двигателями и другими исполнительными устройствами, – скачки температуры в структурах полупроводниковых приборов вследствие их включения и выключения. Соответственно, для обеспечения надежности работы силовых схем, установленных на печатных платах, необходимы оценки и прогноз электротепловых переходных характеристик в мощных компонентах схем с учетом условий охлаждения. Традиционно используются два основных подхода к электротепловому моделированию на уровне печатных плат и блоков.

Первый подход – использование взаимосвязанных Spice-подобных симуляторов электрических цепей и пакетов 3D численного моделирования тепловых полей на основе пакетов AnSYS, Flotherm, Comsol и т. д. [1–4]. В данном случае обеспечивается полное решение задачи электротеплового моделирования мощных электронных схем, но его реализация весьма сложна ввиду необходимости 3D-описания конструкции и больших временных затрат на получение итерационного численного решения.

Второй подход – использование только Spice-подобных симуляторов электрических цепей для смешанного электротеплового моделирования исходной электронной схемы и электротепловых подсхем для мощных электронных компонентов. Корпуса компонентов и радиаторы охлаждения описываются тепловыми параметрами [5–8]. При этом подходе применяются более простые описания тепловых параметров компонентов, требуется меньше временных затрат, тепловые режимы компонентов схемы можно оценивать еще на этапе разработки схем, что удобно для разработчиков [8]. Данный подход используется в некоторых Spice-симуляторах [9–11], но для очень ограниченного набора компонентов. Кроме того, генерация тепловых схем электронных компонентов в работах [9–11] не автоматизирована.

Таким образом, на сегодняшний день универсальное решение для анализа электротепловых режимов компонентов мощных схем отсутствует. Цель настоящей работы – упрощение и автоматизация электротепловых расчетов мощных электронных схем, реализованных на печатных платах. Для решения поставленной задачи предлагается следующее:

– использование более быстрого программного средства «Асоника-ТМ» [12] для 2.5D теплового анализа печатных плат вместо традиционных 3D-пакетов теплового анализа;

– реализация дополнительного программного средства для автоматизации передачи значений мощности и температур компонентов между пакетом Spice-анализа и пакетом «Асоника-М»;

– автоматизация процесса расчета мощностей компонентов мощной схемы.

Программные средства и объект исследования. В качестве симулятора электрических цепей использовали LTSpice. Для упрощения процесса электротеплового моделирования мощных схем, смонтированных на печатных платах, применяли разработанные специализированные программные средства для обработки данных и их передачи между симуляторами [13–16] (рис. 1).

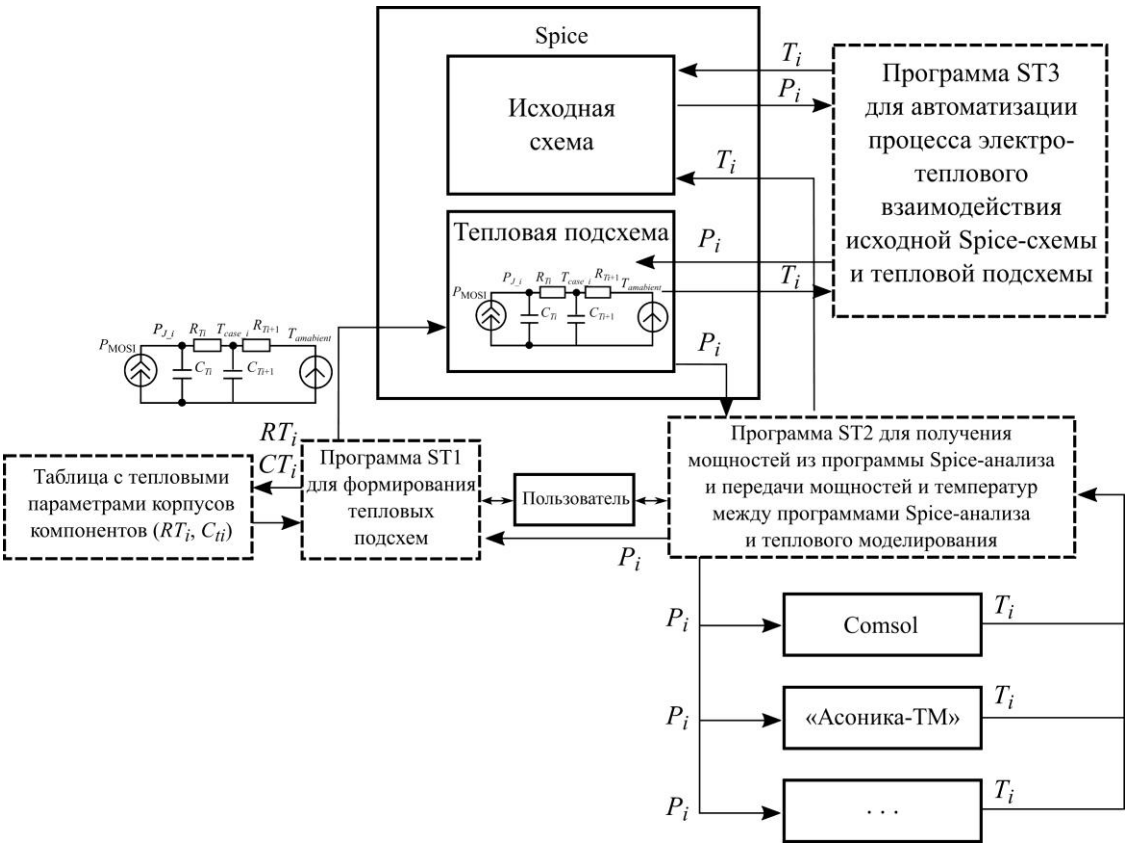


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия программных средств при электротепловом моделировании силовых схем на печатных платах (пунктиром выделены разработанные программные средства)
Fig. 1. Scheme of software tools interactions for electro-thermal modeling and simulation of power circuits on PCBs used in the present paper (the dotted line highlights the developed software tools)

Программный инструмент ST1 обеспечивает автоматическую генерацию тепловых подсхем для корпусов силовых компонентов схемы с учетом подключенного радиатора охлаждения. ST1 использует тепловые параметры корпусов компонентов из специально сформированной Exel-таблицы с подробными тепловыми параметрами широко применяемых корпусов силовых транзисторов и диодов.

Программный инструмент ST2 имеет следующие возможности: автоматизированное, управляемое пользователем определение мощностей P_i элементов схемы в программе Spice-анализа; передача мощностей P_i компонентов из Spice в пакеты теплового анализа Comsol, «Асоника-ТМ» и т. д.; передача значений температуры T_i компонентов из пакетов теплового анализа в программу Spice-анализа.

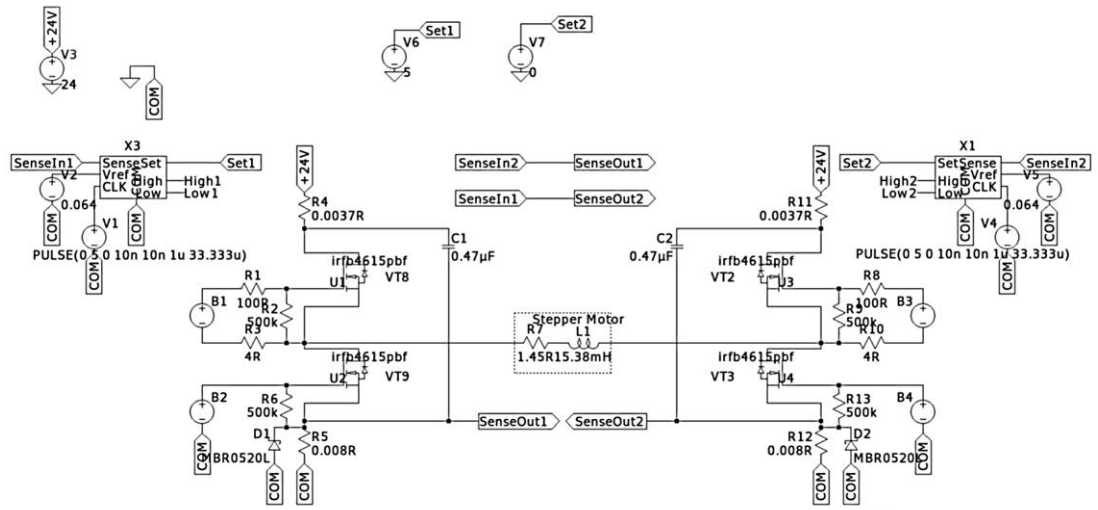
Программный инструмент ST3 обеспечивает автоматизацию двухстадийного итерационного электротеплового расчета схемы с использованием только Spice-анализа:

– запускает в симуляторе LTSpice расчет исходной схемы вместе с полной электротепловой моделью в течение нескольких тактов работы схемы, получает из нее рассчитанные средние значения мощностей силовых компонентов;

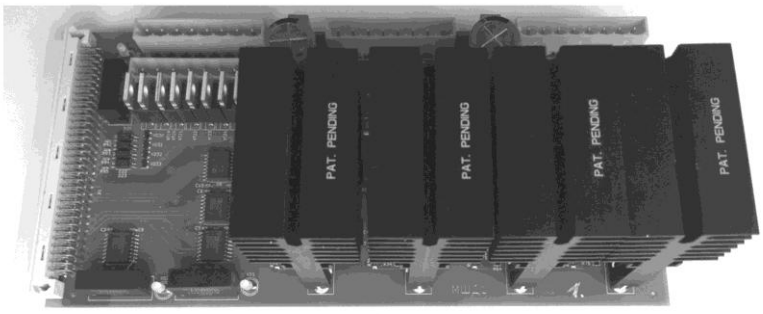
– запускает симулятор LTSpice с отдельной тепловой подсхемой для мощных компонентов с усредненными значениями мощностей компонентов, на основе результатов Spice-анализа тепловой подсхемы определяет средние температуры корпусов компонентов в установившемся тепловом режиме и передает их в исходную схему вместе с тепловой подсхемой.

Указанный итерационный процесс повторяют до достижения заданной погрешности расчета температур компонентов.

Кроме 3D-моделирования Comsol [13] использовали средство 2.5D теплового моделирования «Асоника-ТМ» [12], разработанное в Московском институте электроники и математики им. А. Н. Тихонова (НИУ ВШЭ). Программа имеет следующее преимущество: быстрый расчет теплового режима печатной платы вследствие аналитических тепловых моделей для компонентов платы. Набор программных средств (см. рис. 1) использовали для электротеплового анализа схемы управления мощным четырехфазным шаговым двигателем (рис. 2), разработанным и изготовленным ООО «Компекс-Т» (г. Москва). Схема представляет собой мост с четырьмя ДМОП-транзисторами IRFB4615 на каждую фазу двигателя [17]. Каждый ДМОП-транзистор размещали на радиаторе OMNI-UNI-30-50-D [18] с тепловым сопротивлением R_θ = 4,06 °C/Вт при естественной конвекции. Транзистор IRFB4615 имеет типовое сопротивление канала в открытом состоянии $R_{ds\,on}$ = 35 мОм. Вся схема запитана от источника напряжения 24 В.



а



б

Рис. 2. Схема выходной части мощной схемы управления двигателем (*а*) и ее конструкция на печатной плате (*б*)

Fig. 2. Simplified schematic of output stage (*a*) and PCB realization (*b*) of stepper motor driver circuit

Электротепловое моделирование схемы драйвера шагового двигателя. *Spice-моделирование.* Для анализа теплового режима платы схемы управления (см. рис. 2) с использованием пакетов Comsol, «Асоника-ТМ» и других необходимы значения мощностей выходных транзисторов в установившемся температурном режиме платы вместе с радиаторами охлаждения. Мощности транзисторов зависят от их температуры, при этом схема драйвера выходит на стационарный тепловой режим примерно за 50 мин. Детальное электротепловое Spice-моделирование схемы драйвера с использованием оригинальной электронной схемы (см. рис. 2) и дополнительной тепловой подсхемы для мощных компонентов (рис. 3) не позволило добиться стационарного теплового режима вследствие неприемлемо больших затрат процессорного времени, так как временной шаг при Spice-моделировании составил около 1 мкс ввиду рабочей частоты схемы 30 кГц, но постоянная времени тепловой части на много порядков больше (из-за больших значений тепловых емкостей корпуса транзистора и радиатора). Эта проблема электротеплового моделирования схем с очень большой разницей в постоянных времени для электронной и тепловой частей хорошо известна [7, 19].

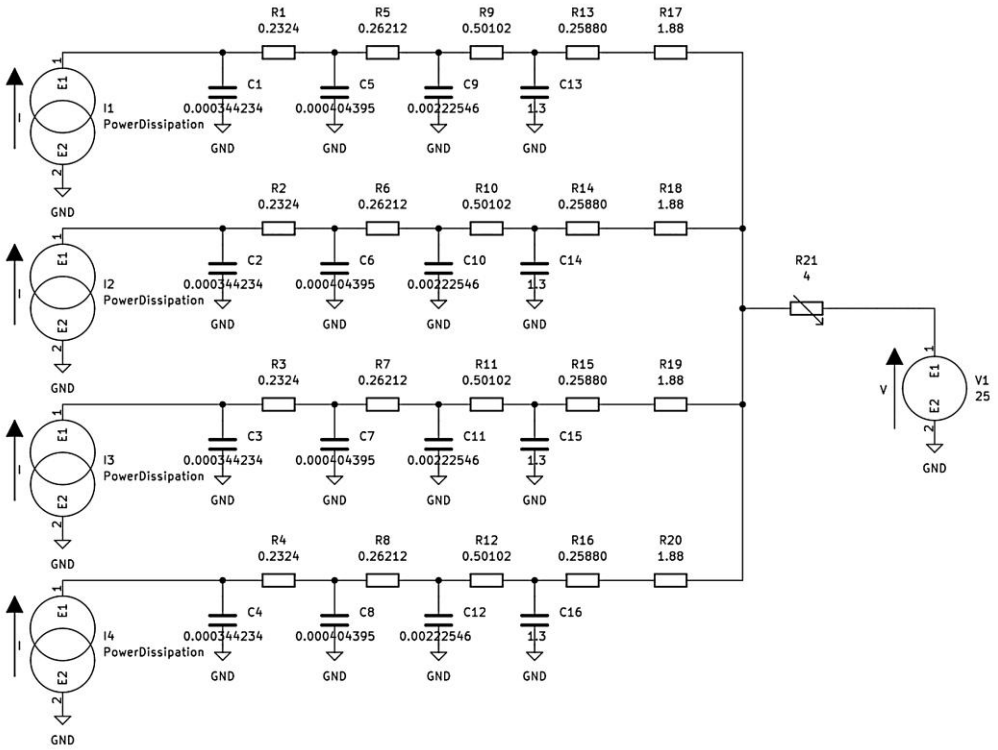


Рис. 3. Тепловая схема четырехвыходных ДМОП-транзисторов, установленных на радиаторе
Fig. 3. Thermal subcircuit for 4 output DMOSFETs mounted on heat-sink

В работе применен следующий подход, существенно ускоряющий электротепловой расчет. При применении разработанного программного средства ST2 и подготовленной таблицы с тепловыми параметрами широко используемых корпусов силовых элементов автоматически сформирована эквивалентная тепловая подсхема для транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 с учетом их параметров корпусов и данных радиатора. Из исходной Spice-схемы управления (см. рис. 2, *а*) с помощью вспомогательной программы ST1 автоматически определяли средние мощности транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 при работе схемы в течение ≈ 15 мс при фиксированной температуре окружающей среды 40 °С. Далее мощности транзисторов подставляли в сгенерированную тепловую схему

(см. рис. 3) и рассчитывали температуру транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 в установившемся тепловом режиме, используя Spice-анализ только с тепловой схемой. Простая тепловая *RC*-цепь моделируется очень быстро. Затем итерационно с использованием программы ST3 в исходную схему управления (см. рис. 2, *а*) передавали значения температуры транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9, рассчитанные по тепловой схеме (см. рис. 3), и определяли новые значения мощности этих транзисторов. Процесс передачи значений температуры и мощности повторяли несколько раз. Этот итерационный процесс заканчивался, когда от итерации к итерации достигались заранее заданные небольшие изменения значений мощности и температуры силовых транзисторов (десятые доли градуса). Таким образом, потребовалось четыре итерации. На рис. 4 показаны смоделированные с помощью Spice температурные зависимости корпусов выходных силовых транзисторов от времени после четвертой итерации.

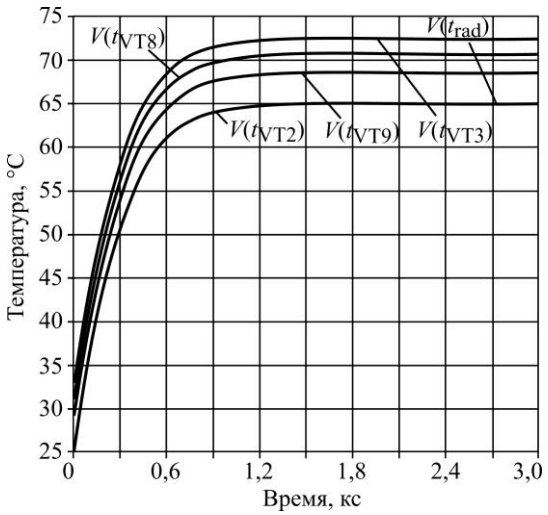
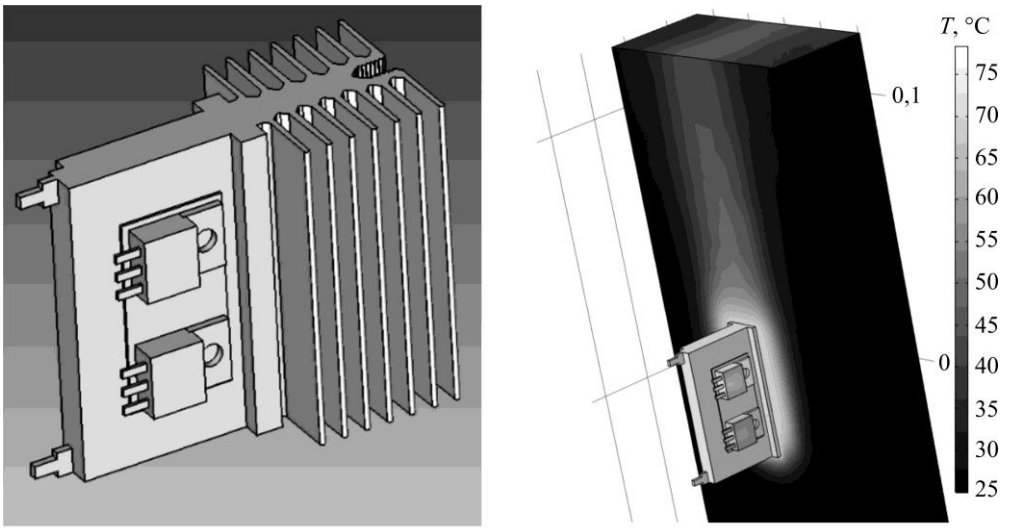


Рис. 4. Spice смоделированная зависимость температуры кристаллов МОП-транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 (см. рис. 2) и радиатора от времени после четвертой итерации по температуре и мощности

Fig. 4. Spice simulated temperature-time dependences for MOS transistors VT2, VT3, VT8, VT9 cases in the circuit fig. 2 after the 4th iteration

Comsol-моделирование. Значения мощностей выходных транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 схемы управления при выходе схемы на стационарный тепловой режим передавали в пакет 3D теплового моделирования Comsol, где были сформированы 3D-описания корпусов транзисторов и радиаторов. На рис. 5, *а* показано 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на корпусе радиатора в пакете



а ***б***

Рис. 5. 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на корпусе радиатора (*а*), и распределение температуры в силовых транзисторах и радиаторе (*б*), смоделированные в пакете Comsol

Fig. 5. 3D view of power MOSFETs mounted on heat-sink case (*a*) and temperature distribution in power MOSFETs and heat-sink (*b*), simulated using Comsol software tool

Comsol, на рис. 5, *б* – смоделированное с использованием Comsol распределение температуры в силовых транзисторах и радиаторе. Полученные значения температур силовых транзисторов близки к значениям, полученным при Spice-анализе схемы, что говорит о корректности примененных тепловых параметров корпусов транзисторов и радиаторов.

Моделирование в программном комплексе «Асоника-ТМ». Для оценки распределения температуры по плате схемы управления плата вместе с мощными транзисторами описана в пакете «Асоника-ТМ». Мощности транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 определяли в процессе Spice-моделирования работы схемы при выходе ее на стационарный тепловой режим и переносили из программы Spice в программу «Асоника-ТМ» [14], значения температуры силовых элементов передавали обратно в программу Spice с помощью инструмента ST2.

На рис. 6, *а* представлено 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на радиаторе (для транзисторов всех четырех фаз), в программном комплексе «Асоника-ТМ». Питание подавали на два моста из четырех. На рис. 6, *б* показано смоделированное распределение температуры в работающих силовых транзисторах и печатной плате.

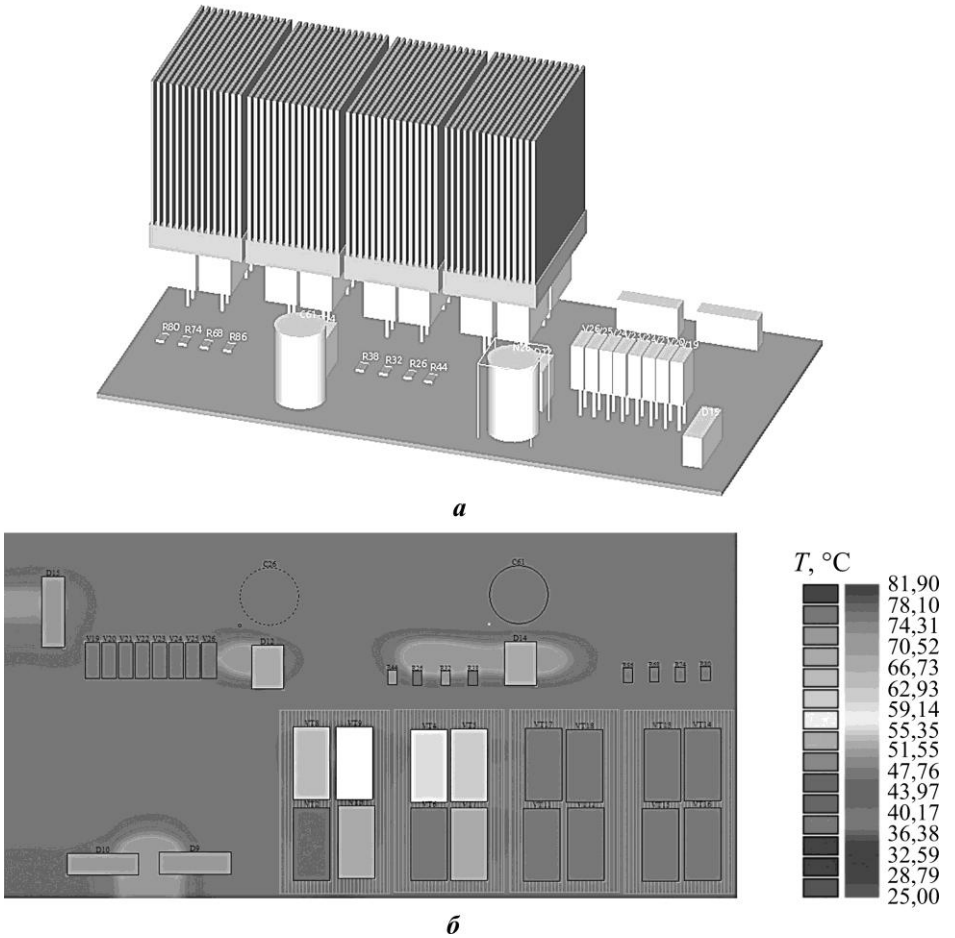


Рис. 6. 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на радиаторе (*а*), и распределение температуры в работающих силовых транзисторах и печатной плате (*б*), смоделированные в программном комплексе «Асоника-ТМ»

Fig. 6. 3D view of power MOSFETs mounted on heat-sink (*a*) and temperature distribution in operating power MOSFETs and PCB (*b*) simulated using Asonika-TM software tool

Тепловизионный анализ теплового режима платы схемы управления двигателем. Для исследования теплового режима платы схемы управления шаговым двигателем и проверки результатов электротеплового моделирования использовали тепловизионную камеру Flir A-40. Полученное распределение температуры на силовых транзисторах (одной фазы) в установившемся тепловом режиме представлено на рис. 7.

В таблице приведены значения температуры мощных транзисторов, полученные методом ИК-измерений и в результате моделирования с использованием программного обеспечения Spice, Comsol и «Асоника-ТМ». Видно, что полученные результаты по своим значениям соответствуют друг другу.

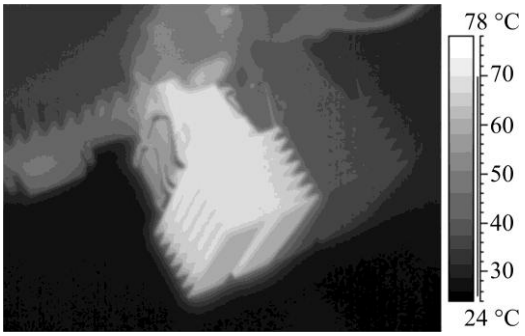


Рис. 7. Распределение температуры на силовых транзисторах (одной фазы) в установившемся тепловом режиме, измеренное с использованием тепловизора Flir A40

Fig. 7. Temperature distribution in power MOSFETs (one phase) in a steady state thermal mode, measured with Flir A40 thermal imaging camera

Значения температуры силовых транзисторов схемы управления
The power transistor temperature values

Транзистор	Мощность, Вт	ИК-измерение	Программное обеспечение		
			Spice	«Асоника-ТМ»	Comsol
VT8	3,04	72,1	70,7	66,76	73,3
VT9	1,91	72,7	68,6	55,35	71,0
VT2	0	67,7	64,9	31,37	67,4
VT3	4	74,5	72,5	77,84	75,2
Радиатор	0	67,3	64,9	–	67,4

Важнейшим параметром модуля драйвера печатной платы, напрямую связанным с тепловыми эффектами, является надежность. С этой точки зрения модуль печатной платы анализировали в жестком электротепловом режиме, соответствующем следующим условиям эксплуатации блока: температура окружающей среды 40 °С, максимальное значение сопротивления канала IRFB4615 $R_{ds\,on}$ = 39 мОм, напряжение питания 28 В. Для этой цели использовали разработанную электротепловую Spice-модель ДМОП-транзистора IRFB4615.

Скачки температуры МОП-транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 для жесткого электротеплового режима, смоделированные программой Spice, представлены на рис. 8, *а*. Видно, что максимальные температуры перехода МОП-транзистора VT3 составляли около 115 °С, что может привести к выходу МОП-транзистора из строя. Для улучшения условий охлаждения предлагается использовать более крупный радиатор с меньшим тепловым сопротивлением R_θ = 2,5 °С/Вт (вместо R_θ = 4,06 °С/Вт) в условиях естественной конвекции. На рис. 8, *б* приведены результаты Spice-моделирования значений температуры для этого случая. Максимальные температуры перехода МОП-транзисторов достигают меньших значений (84 °С). Это приемлемо с точки зрения надежности работы схемы.

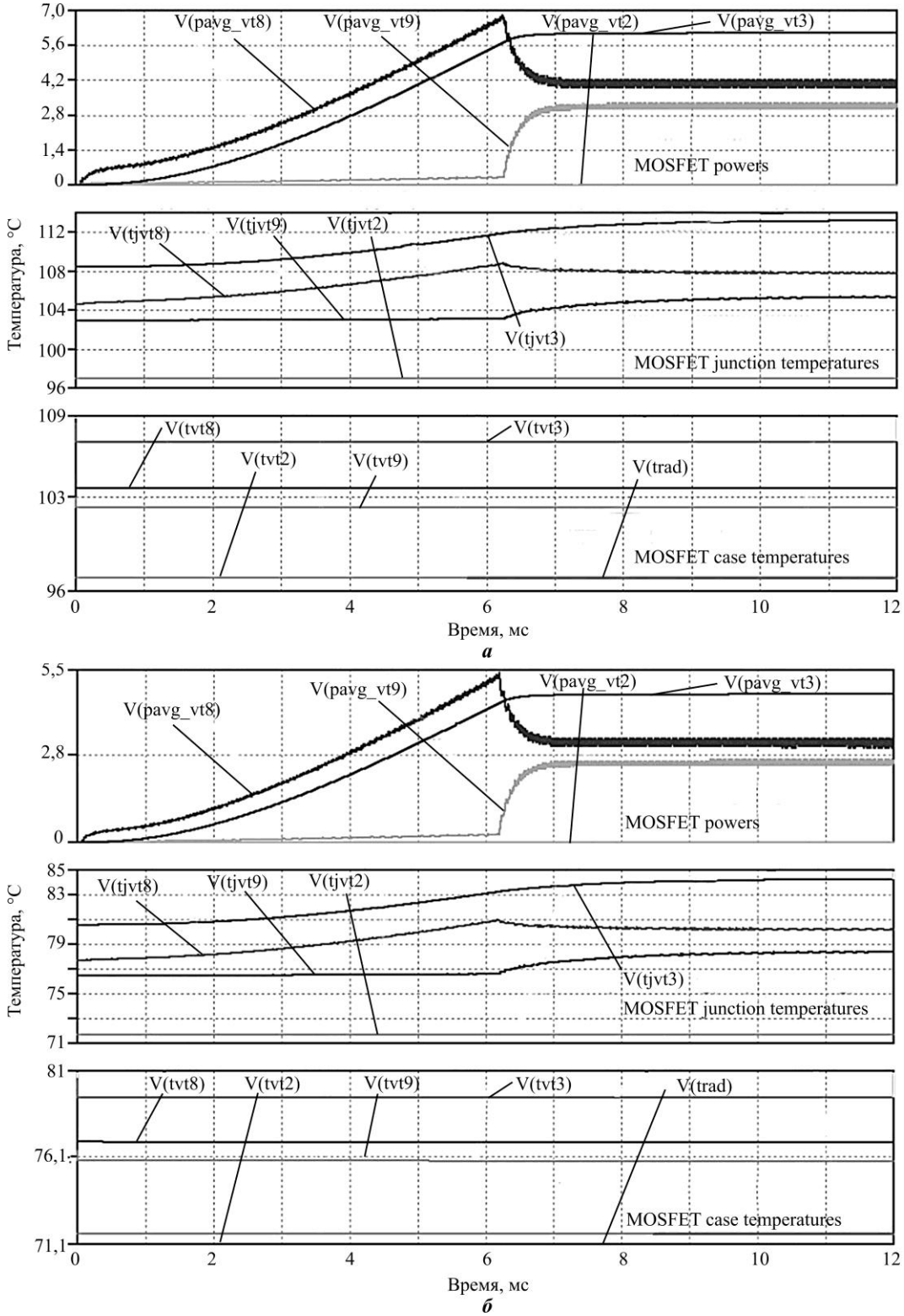


Рис. 8. Смоделированные программой Spice скачки температуры МОП-транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 для жесткого электротеплового режима работы схемы и исходного радиатора: *а* – без использования радиатора; *б* – с использованием радиатора с меньшим тепловым сопротивлением R_0 = 2,5 °C/Вт

Fig. 8. Spice simulated temperature jumps of MOSFETs VT2, VT3, VT8, VT9 for the most hard thermal mode of circuit and original heat-sink operation: *a* – without the use of heat-sink; *b* – in enhanced cooling conditions – using the larger heat-sink with R_0 = 2.5 °C/W

Заключение. Разработанные дополнительные программные средства обеспечивают: автоматизированное определение мощностей элементов схемы в программе моделирования Spice; передачу значений температуры элементов в пакет теплового моделирования (Comsol, «Асоника-ТМ» и др.); передачу значений температуры элементов схемы из пакета теплового моделирования обратно в пакет моделирования схем Spice; автоматизированную передачу значений мощностей и температур компонентов между Spice-расчетом исходной схемы и Spice-расчетом тепловой подсхемы для мощных компонентов схемы. Созданная специальная база данных тепловых характеристик для мощных компонентов, включающая в себя названия корпусов компонентов и параметры их тепловой схемы (R_{ti}, C_{ti}), значительно упрощает и ускоряет процесс автоматизированного формирования тепловых подсхем схем компонентов электронных модулей.

Анализ электротеплового режима реальной печатной платы управления мощным шаговым двигателем с мощными ДМОП-транзисторами показал эффективность предложенной методики. Достигнуто значительное ускорение процесса электротеплового моделирования (более чем в 10 раз) по сравнению с ручным формированием тепловой подсхемы для схемы электронных компонентов. Предложенные и проанализированные способы позволяют снизить значения температуры выходных ДМОП-транзисторов при обнаружении возможных тепловых отказов.

Литература

1. ***Poppe A.*** Electro-thermal simulation: Methods, tools, examples // StudyLib [Электронный ресурс]. 2004. URL: https://studylib.net/doc/9674147/electro-thermal-simulation (дата обращения: 20.11.2023).

2. ***Shinoda T.*** Three thermal simulation & test innovations for electronics equipment design // Electronics Cooling [Электронный ресурс]. 2019. URL: https://www.electronics-cooling.com/2019/06/three-thermal-simulation-test-innovations-for-electronics-equipment-design/ (дата обращения: 20.11.2023).

3. ***Hauck T., Teulings W., Rudnyi E.*** Electro-thermal simulation of multi-channel power devices on PCB with SPICE // 2009 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems. Leuven: IEEE, 2009. P. 124–129.

4. PSpice-COMSOL-based 3-D electrothermal–mechanical modeling of IGBT power module / ***Y. Jia, F. Xiao, Y. Duan et al.*** // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2020. Vol. 8. No. 4. P. 4173–4185. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2935037

5. ***Ali K. M., Sommet R., Mons S., Ngoya E.*** Behavioral electro-thermal modeling of power amplifier for system-level design // 2018 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMIC). Brive La Gaillarde: IEEE, 2018. P. 1–3. https://doi.org/10.1109/INMMIC.2018.8430009

6. ***Codecasa L., D'Alessandro V., Magnani A., Irace A.*** Circuit-based electrothermal simulation of power devices by an ultrafast nonlinear MOR approach // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31. No. 8. P. 5906–5916. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2494500

7. ***Ma K., Blaabjerg F.*** Multi-timescale modelling for the loading behaviours of power electronics converter // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal: IEEE, 2015. P. 5749–5756. https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310467

8. ***Blackmore B.*** The future of thermal design – earlier electrothermal analysis // Siemens Blogs [Электронный ресурс]. 17.12.2020. URL: https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/future-of-thermal-design-electrothermal-modeling-bci-rom-vhdl-ams/ (дата обращения: 12.02.2022).

9. ***Eddleman D.*** LTspice: SOAtherm support for PCB and heat sink thermal models // Analog Devices [Электронный ресурс]. URL: https://www.analog.com/en/technical-articles/ltspice-soatherm-support-for-pcb-and-heat-sink-thermal-models.html (дата обращения: 12.02.2022).

10. ***Vogt H.*** Tutorial: ngspice electro-thermal simulation // NGSPICE [Электронный ресурс]. URL: http://ngspice.sourceforge.net/ngspice-electrothermal-tutorial.html (дата обращения: 22.11.2023).

11. ***Blackmore B.*** Electrothermal circuit simulation enabled by VHDL-AMS thermal netlists // Siemens Blogs [Электронный ресурс]. 11.09.2020. URL: https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/electrothermal-simulation-thermalnetlist-vhdl-ams-flotherm/ (дата обращения: 12.02.2022).

12. АСОНИКА [Электронный ресурс]. URL: https://asonika-online.ru (дата обращения: 22.11.2023).

13. COMSOL [Электронный ресурс]. URL: https://www.comsol.com (дата обращения: 22.11.2023).

14. The Spice page // EECS Department of the University of California at Berkeley [Электронный ресурс]. URL: http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/ (дата обращения: 22.11.2023).

15. ***Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Ryabov N. I.*** Electro-thermal design of smart power devices and integrated circuits // Adv. Mat. Res. 2014. Vol. 918. P. 191–194. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.918.191

16. Extension of the capabilities of SPICE analysis tools for electro-thermal simulation of power electronic circuits / ***I. Kharitonov, G. Klopotov, V. Kobyakov et al.*** // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow: IEEE, 2022. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802371

17. IRFB4615PbF International Rectifier // Infineon Technologies [Электронный ресурс]. 05.09.2008. URL: https://www.infineon.com/dgdl/irfb4615pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356165a741e42 (дата обращения: 22.11.2023).

18. OMNI-UNI-30-50-D Wakefield-Vette // Mouser Electronics Europe [Электронный ресурс]. URL: https://eu.mouser.com/ProductDetail/Wakefield-Vette/OMNI-UNI-30-50-D (дата обращения: 12.02.2022).

19. Mission-profile-based lifetime prediction for a SiC MOSFET power module using a multi-step condition-mapping simulation strategy / ***L. Ceccarelli, R. M. Kotecha, A. S. Bahman et al.*** // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34. No. 10. P. 9698–9708. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2893636

Статья поступила в редакцию 21.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.07.2023 г.;
принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллиннская ул., 34), главный научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), kpetrosyants@hse.ru

Харитонов Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, ул. Таллиннская, 34), ikharitonov@hse.ru

Тегин Михаил Сергеевич – ведущий инженер-электроник ООО «Компекс-Т» (Россия, 117630, г. Москва, Старокалужское шоссе, 62), mstegin@edu.hse.ru

References

1. Poppe A. Electro-thermal simulation: Methods, tools, examples. *StudyLib*. 2004. Available at: https://studylib.net/doc/9674147/electro-thermal-simulation (accessed: 20.11.2023).

2. Shinoda T. Three thermal simulation & test innovations for electronics equipment design. *Electronics Cooling*. 2019. Available at: https://www.electronics-cooling.com/2019/06/three-thermal-simulation-test-innovations-for-electronics-equipment-design/ (accessed: 20.11.2023).

3. Hauck T., Teulings W., Rudnyi E. Electro-thermal simulation of multi-channel power devices on PCB with SPICE. *2009 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems.* Leuven, IEEE, 2009, pp. 124–129.

4. Jia Y., Xiao F., Duan Y., Luo Y., Liu B., Huang Y. PSpice-COMSOL-based 3-D electrothermal–mechanical modeling of IGBT power module. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 4173–4185. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2935037

5. Ali K. M., Sommet R., Mons S., Ngoya E. Behavioral electro-thermal modeling of power amplifier for system-level design. *2018 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMIC).* Brive La Gaillarde, IEEE, 2018, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/INMMIC.2018.8430009

6. Codecasa L., D'Alessandro V., Magnani A., Irace A. Circuit-based electrothermal simulation of power devices by an ultrafast nonlinear MOR approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 8, pp. 5906–5916. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2494500

7. Ma K., Blaabjerg F. Multi-timescale modelling for the loading behaviours of power electronics converter. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).* Montreal, IEEE, 2015, pp. 5749–5756. https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310467

8. Blackmore B. The future of thermal design – earlier electrothermal analysis. *Siemens Blogs.* 17.12.2020. Available at: https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/future-of-thermal-design-electrothermal-modeling-bci-rom-vhdl-ams/ (accessed: 12.02.2022).

9. Eddleman D. LTspice: SOAtherm support for PCB and heat sink thermal models. *Analog Devices.* Available at: https://www.analog.com/en/technical-articles/ltspice-soatherm-support-for-pcb-and-heat-sink-thermal-models.html (accessed: 12.02.2022).

10. Vogt H. Tutorial: ngspice electro-thermal simulation. *NGSPICE.* Available at: http://ngspice.sourceforge.net/ngspice-electrothermal-tutorial.html (accessed: 22.11.2023).

11. Blackmore B. Electrothermal circuit simulation enabled by VHDL-AMS thermal netlists. *Siemens Blogs.* 11.09.2020. Available at: https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/electrothermal-simulation-thermalnetlist-vhdl-ams-flotherm/ (accessed: 12.02.2022).

12. *ASONIKA.* Available at: https://asonika.com (accessed: 22.11.2023).

13. *COMSOL.* Available at: https://www.comsol.com (accessed: 22.11.2023).

14. The Spice page. *EECS Department of the University of California at Berkeley.* Available at: http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/ (accessed: 22.11.2023).

15. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Ryabov N. I. Electro-thermal design of smart power devices and integrated circuits. *Adv. Mat. Res.*, 2014, vol. 918, pp. 191–194. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.918.191

16. Kharitonov I., Klopotov G., Kobyakov V., Tegin M., Silchenko E., Ivlev K., Loktionov D. Extension of the capabilities of SPICE analysis tools for electro-thermal simulation of power electronic circuits. *2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT).* Moscow, IEEE, 2022, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802371

17. IRFB4615PbF International Rectifier. *Infineon Technologies.* 05.09.2008. Available at: https://www.infineon.com/dgdl/irfb4615pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356165a741e42 (accessed: 22.11.2023).

18. OMNI-UNI-30-50-D Wakefield-Vette. *Mouser Electronics Europe.* Available at: https://eu.mouser.com/ProductDetail/Wakefield-Vette/OMNI-UNI-30-50-D (accessed: 12.02.2022).

19. Ceccarelli L., Kotecha R. M., Bahman A. S., Iannuzzo F., Mantooth H. A. Mission-profile-based lifetime prediction for a SiC MOSFET power module using a multi-step condition-mapping simulation strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, no. 10, pp. 9698–9708. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2893636

The article was submitted 21.07.2023; approved after reviewing 27.07.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinnskaya st., 34), Chief Researcher, Institute of Design Problems of Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), kpetrosyants@hse.ru

Igor A. Kharitonov – Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department , Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinnskaya st., 34), ikharitonov@hse.ru

Mikhail S. Tegin – Leading Electronics Engineer, "Kompex-T" LLC (Russia, 117630, Moscow, Starokaluzhskoe ave., 62), mstegin@edu.hse.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

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

МИКРО- И НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА
MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNOLOGY

Научная статья
УДК 621.3.049.779:681.586
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-79-88
EDN: WKBHSJ

Технологические аспекты изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков удара

Е. С. Кочурина[1,2], А. И. Виноградов[1,2], Л. Р. Боев[1,2], Н. М. Зарянкин[1,2], С. А. Анчутин[1,2], И. С. Дернов[1,2], А. С. Тимошенков[1,2], С. П. Тимошенков[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]ООО «Лаборатория микроприборов», г. Москва, Россия

ekochurina@mp-lab.ru

Аннотация. При индикации ударных воздействий используются различные типы устройств – от разрушающих пломб до сложных инерционных систем. Возникает необходимость в разработке устройства, которое способно сигнализировать о превышении допустимого ускорения или о том, что груз был подвержен ударному воздействию. Примером такого устройства может быть датчик удара. В работе представлены разработанная оригинальная конструкция чувствительного элемента микромеханического датчика удара КМГ-1 и принцип его работы. В качестве материала для изготовления чувствительного элемента микромеханического датчика удара использована КНИ-структура с ориентацией рабочего слоя (111). Рассмотрены основные технологические операции изготовления прототипа микромеханического датчика удара с использованием Bosch-процесса и эвтектического сращивания. Определены параметры глубокого травления кремния. Подобраны процесс травления, уменьшающий эффект подтравливания готовых структур на границе разделения приборный слой – диэлектрик, а также параметры эвтектического сращивания кремниевых структур. Показано, что применение предлагаемого технологического процесса позволяет получать допуск на уровень срабатывания от 10 до 50 %. Разработанный микромеханический датчик удара КМГ-1 может использоваться для фиксации различных ударных воздействий при транспортировании груза.

Ключевые слова: микромеханический датчик удара, чувствительный элемент, кремний на изоляторе, глубокое травление кремния, эвтектическое соединение

© Е. С. Кочурина, А. И. Виноградов, Л. Р. Боев, Н. М. Зарянкин, С. А. Анчутин, И. С. Дернов, А. С. Тимошенков, С. П. Тимошенков, 2024

Для цитирования: Технологические аспекты изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков удара / Е. С. Кочурина, А. И. Виноградов, Л. Р. Боев и др.// Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 79–88. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-79-88. – EDN: WKBHSJ.

Original article

Technological aspects of manufacturing sensing elements of micromechanical impact sensors

E. S. Kochurina[1,2], A. I. Vinogradov[1,2], L. R. Boev[1,2], N. M. Zaryankin[1,2], S. A. Anchutin[1,2], I. S. Dernov[1,2], A. S. Timoshenkov[1,2], S. P. Timoshenkov[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]"Laboratory of Micro-Devices" LLC, Moscow, Russia

ekochurina@mp-lab.ru

Abstract. Modern approach to cargo transportation evaluation consists in continuous collection of such object data as nature and level of diverse effects while in operation, and their intensity. In the process of impact indication various types of devices are used, from destructive sealing to complex inertial systems. A need arises to design a device that can report the exceeding of allowable acceleration or the cargo exposure to impact action. An example of such a device would be an impact sensor. In this work, the developed design of the micromechanical impact sensor KMG-1 and the principle of its operation are presented. A silicon-on-insulator structure with the (111) orientation of working layer was used as material for sensitive element manufacturing. The main stages of the technological process of manufacturing a prototype of micromechanical impact sensor using Bosch process and eutectic soldering are considered. The parameters of deep etching of silicon were set. The etching process has been adjusted to reduce the effect of ready structures undercut on the line of device layer – insulator division. The parameters of silicon patterns eutectic soldering have been selected. It was shown that the use of proposed technological process allows obtaining a tolerance for a response level from 10 to 50 %. The developed micromechanical impact sensor KMG-1 can be applied to fix various impact actions during cargo transportation.

Keywords: micromechanical impact sensor, sensitive element, silicon-on- insulator, deep silicon etching, eutectic soldering

For citation: Kochurina E. S., Vinogradov A. I., Boev L. R., Zaryankin N. M., Anchutin S. A., Dernov I. S., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P. Technological aspects of manufacturing sensing elements of micromechanical impact sensors. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 79–88. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-79-88. – EDN: WKBHSJ.

Введение. Современный подход к оценке транспортных грузоперевозок заключается в непрерывном накоплении таких данных об объекте, как характер и степень различных воздействий в процессе эксплуатации, их интенсивность. При индикации различных ударных воздействий используются разные типы устройств – от разрушающих пломб до сложных инерциальных систем. В настоящей работе описывается мик-

ромеханический датчик удара КМГ-1, разработанный и изготовленный совместно ООО «ЛМП» (г. Москва, г. Зеленоград) и Институтом нано- и микросистемной техники МИЭТ, может использоваться для фиксации ударных воздействий при транспортировании груза.

Описание конструкции чувствительного элемента и принцип его работы. Структура разработанного чувствительного элемента микромеханического датчика удара показана на рис. 1. При ударном воздействии вдоль оси чувствительности инерционная масса перемещается и образуется контакт с крышкой.

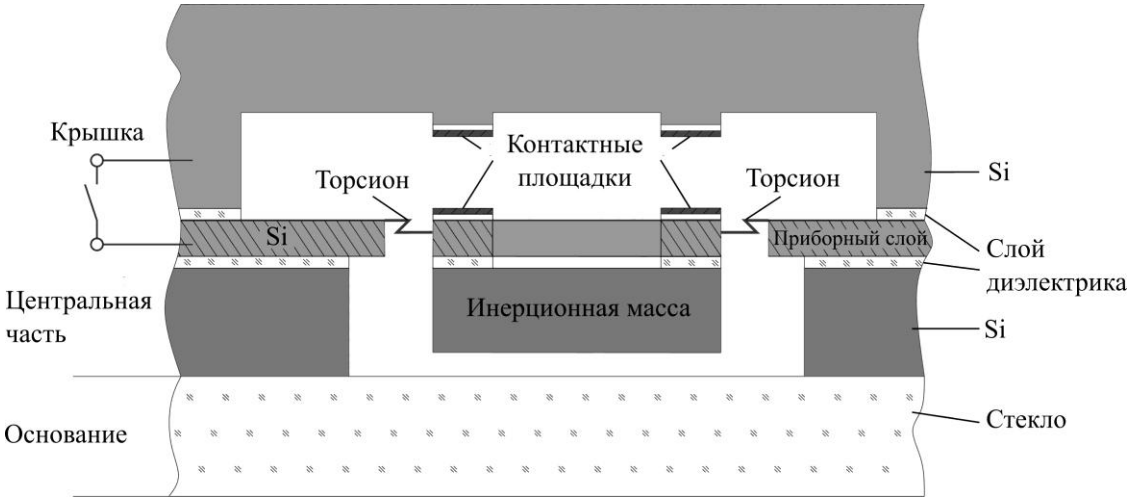


Рис. 1. Структура разработанного микромеханического датчика удара
Fig. 1. The structure of the developed micromechanical impact sensor

Подвес конструкции в сечении имеет форму прямоугольника (рис. 2). Моменты инерции для прямоугольника для главных центральных осей J_y и J_z равны: $J_y = \frac{hb^3}{12}$, $J_z = \frac{bh^3}{12}$.

При ударном воздействии на датчик подвес прогибается (рис. 3). Максимальное смещение при прогибе равно:

$$y_{\max} = -\frac{Pl^3}{3EJ_z},$$

где минус означает направление изменения $y_{\max}$; $P = \frac{ma}{N}$ – сила, действующая на чувствительный элемент; m – инерционная масса; a – действующее ускорение; N – количество торсионов; l – длина торсиона; E – модуль упругости; $K = \frac{P}{y_{\max}}$ – коэффициент упругости балки.

Зависимость коэффициента упругости балки от толщины торсиона имеет вид

$$K = \frac{P}{y_{\max}} = -\frac{3Ebh^3}{I^3}.$$

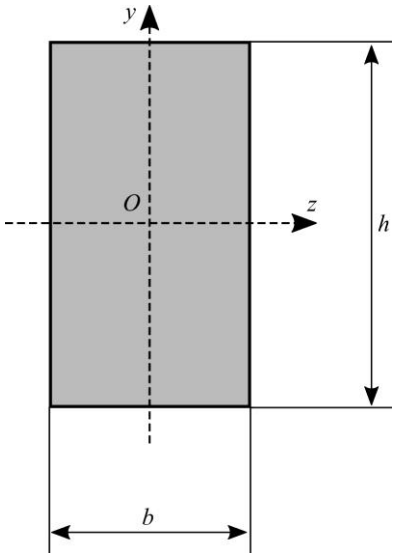


Рис. 2. Сечение подвеса
Fig. 2. Cross section of the suspension

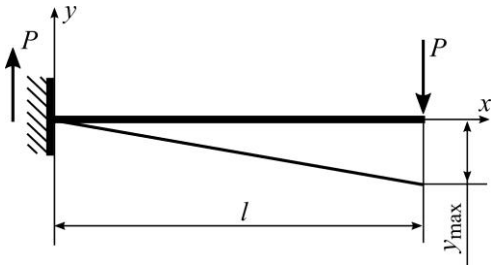


Рис. 3. Схема прогиба торсиона при ударном воздействии
Fig. 3. Scheme of the deflection of the torsion bar under impact

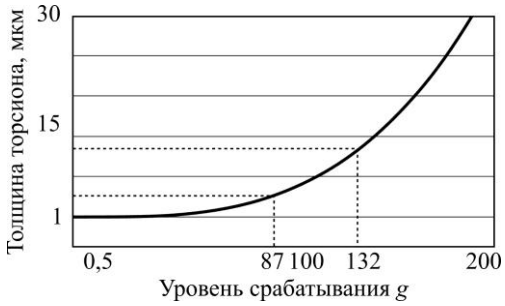


Рис. 4. Зависимость уровня срабатывания от толщины торсиона
Fig. 4. Dependence of the level of operation on the thickness of the torsion bar

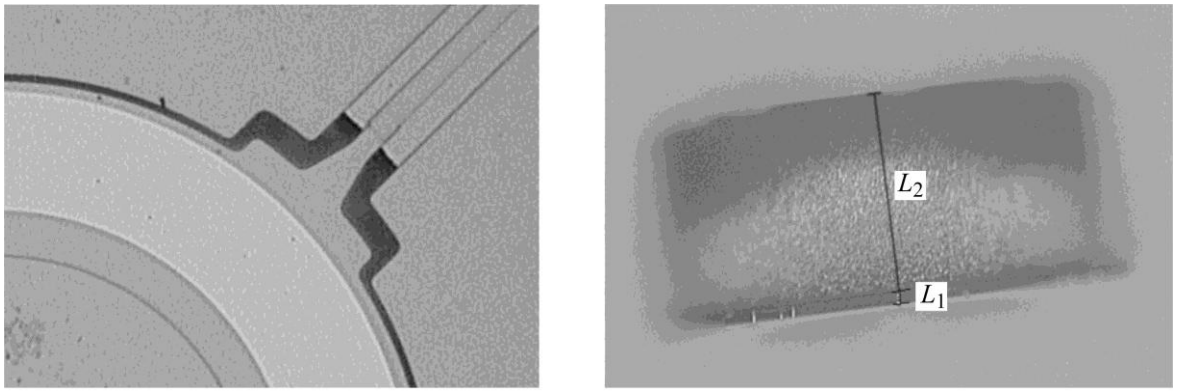
Разработанная конструкция позволяет варьировать ударное воздействие в зависимости от толщины торсиона (рис. 4). По зависимости можно оценить, что если толщина торсиона изготовленного датчика составляет от 5 до 12 мкм, то он будет иметь допуск по уровню срабатывания 20 % (датчик должен сработать в диапазоне 87–132 g). Фактическая толщина торсиона зависит от нескольких факторов, в том числе от качества исходных пластин (погрешности толщины рабочего слоя КНИ-структуры). Снижая погрешность с помощью полировки, шлифовки или других методов, можно при необходимости получить датчик с допуском 10 % и ниже.

Особенности технологии изготовления датчика удара. Технологический маршрут изготовления чувствительного элемента микромеханического датчика удара включает в себя традиционные операции микросистемной техники и микроэлектроники, в том числе глубокое травление кремния и эвтектическое сращивание. В настоящее время существует множество методов для глубокого травления кремния с применением плазмы. Проведенные исследования показали, что оптимальным для кремниевых МЭМС является использование Bosch-процесса. Один из ключевых параметров Bosch-процесса – давление, от которого зависят физические свойства плазмы в объеме рабочей камеры. При формировании профиля с высоким аспектным отношением (более 1 : 20) давление понижается (до 4–5 Па), что позволяет сохранять качество поверхности, в частности уменьшается шероховатость, снижается неоднородность и др. [1–3].

На основании проведенных исследований определены следующие параметры глубокого травления кремния:

Мощность ICP-разряда.....1800 Вт
Давление в реакторе ..... 4,5 Па
Температура электрода .....10 °C
Мощность генератора смещения (400 кГц).....200 Вт
Расходы рабочих газов (SF_6/C_4F_8) .....300/100 $см^3$/мин

На рис. 5 представлены фрагменты чувствительного элемента микромеханического датчика удара. Материалом для изготовления чувствительного элемента датчика удара является КНИ-структура с ориентацией рабочего слоя (111). Использование КНИ-структуры позволяет получать упругие элементы в рабочем слой с толщиной, равной толщине или меньшей толщины приборного слоя, не прибегая к операции глубокого прецизионного травления пластины носителя с обратной стороны структуры.



а ***б***

Рис. 5. Фрагменты чувствительного элемента микромеханического датчика удара: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку (L_1 = 30 мкм, L_2 = 460 мкм)
Fig. 5. Fragments of the sensitive element of the micromechanical impact sensor: *a* – top view; *b* – side view (L_1 = 30 μm, L_2 = 460 μm)

Одна из важнейших характеристик процесса травления – однородность (равномерность) скорости травления по поверхности пластины. Можно предположить, что осевое магнитное поле, наложенное на плазму разряда, способно стабилизировать разряд и способствовать повышению однородности травления. В ходе плазмохимического травления кремния на большую глубину при формировании элементов МЭМС возникает проблема поддержания высокой равномерности травления по всей поверхности обрабатываемой пластины. Это важно при формировании объемных структур, в которых однородность глубины (толщины) элементов непосредственно влияет на качество и воспроизводимость их работы [4–6]. Основные причины возникновения неоднородности [7–10]:

– амбиполярная диффузия, приводящая к снижению плотности плазмы (а следовательно, и скорости травления) на периферии пластины;

– скин-эффект, способствующий повышению скорости травления на периферии пластины;

– загрузочный эффект, проявляющийся при травлении больших открытых площадей кремния с высокой скоростью. Загрузочный эффект снижает скорость травления в центре пластины ввиду затруднения доставки газа-реагента к центру пластины и отвода продуктов реакции.

При травлении КНИ-структур возникает эффект подтравливания готовых структур на границе раздела приборный слой – диэлектрик (рис. 6, *а*). При малой ширине элементов это может приводить к отслаиванию готовых элементов конструкции от платины носителя (рис. 6, *б*). После проведения исследований подобран процесс травления, нивелирующий этот дефект на готовых конструкциях (рис. 6, *в*). Уменьшив энергию отражающихся от поверхности диэлектрика ионов, удается уменьшить или полностью устранить эффект подтрава. Добиться этого можно либо путем уменьшения энергии смещения на подложке (от 150 до 10 Вт), заменив источник смещения на низкочастотный, либо путем сокращения времени перетравливания до минимума (от 1 мин до 10 с).

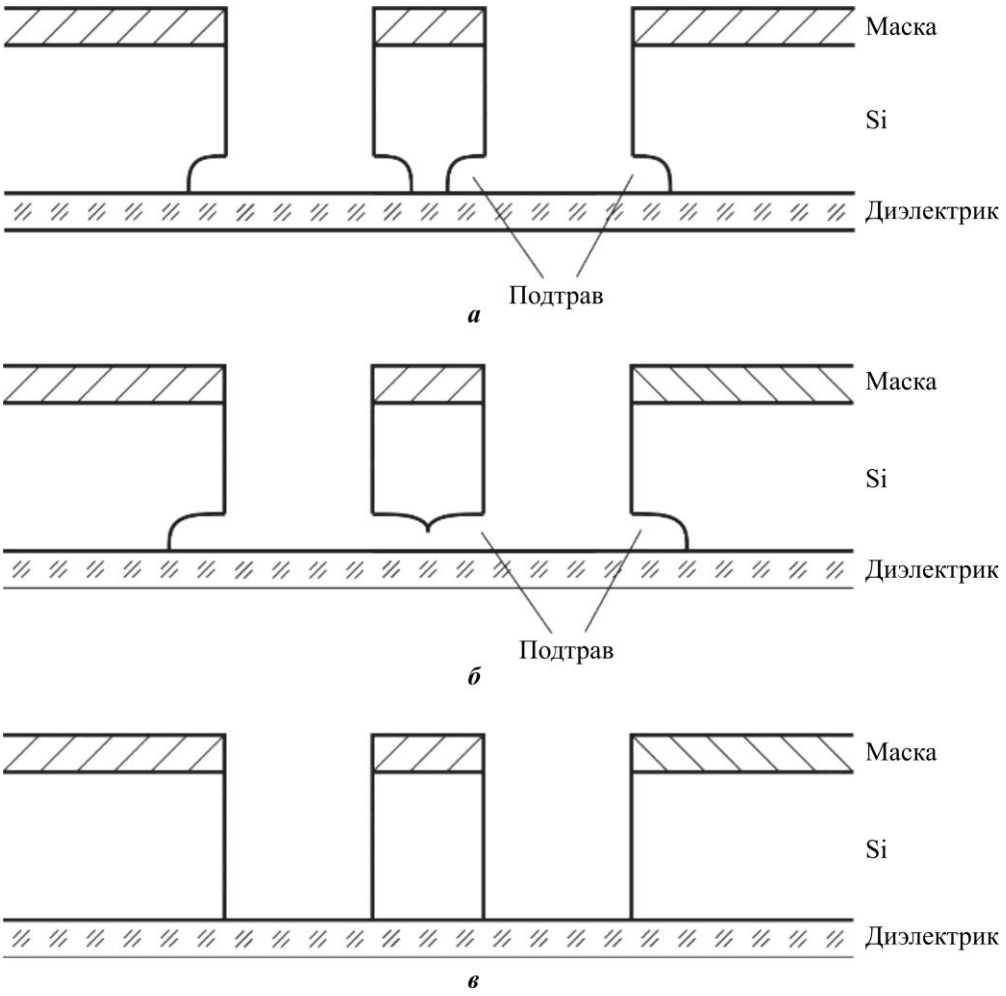
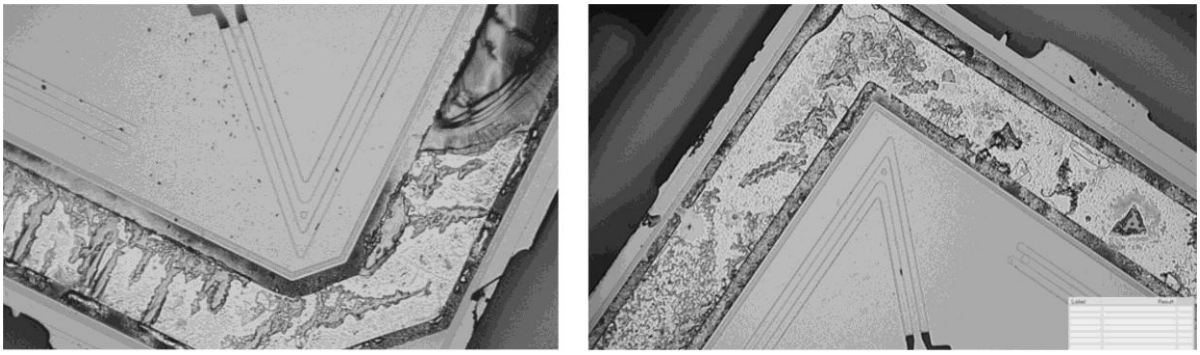


Рис. 6. Схема подтравливания готовых структур: *а* – средний уровень подтрава; *б* – перетрав с вывешиванием структуры; *в* – структура без подтравов

Fig. 6. Scheme of etching of ready structures: *a* – average level of etching; *b* – overtreatment with structure hanging; *c* – structure without undercuts

При создании герметичного объема внутри кристалла и электрической связи между крышкой и приборным слоем КНИ-пластины используется эвтектическое сращивание кремниевых пластин через слой металла (см. рис. 1). Для проведения процесса необходимо нанести на одну из кремниевых поверхностей слой металла, способного образовывать эвтектический сплав с кремнием (Al + Si, SnBi + Si и т. д.), далее следует обеспечить максимально плотный контакт сращиваемых поверхностей на максимальной площади и необходимый температурный профиль процесса по времени и номиналу температуры. На рис. 7 изображены разрушенный эвтектический шов сращивания кремниевой крышки и приборный слой КНИ-пластины. Параметры подобранного режима сращивания кремниевых структур следующие:

Температура сращивания ..... ~ 450 ºС
Давление в камере при сращивании ..... 1 Па
Общее время процесса ..... ~ 2 ч
Усилие прижатия пластин .....200 кг



а ***б***

Рис. 7. Фрагменты эвтектического шва сращивания кремниевой крышки (*а*) и приборного слоя КНИ-пластины (*б*)
Fig. 7. Fragments of the eutectic seam splicing the silicon cover (*a*) and the instrument layer of the SOI wafer (*b*)

Датчик удара вклеивали в корпус. Объем внутри корпуса заполняли защитной атмосферой (осушенным азотом) и герметизировали, сваривая крышку и основание корпуса. Электрическое соединение между контактными площадками кристалла и выводами корпуса осуществляли с помощью проволочных выводов, что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по сравнению с различными технологическими вариантами производства и геометрическим размером изделий. В датчиках удара использовали ультразвуковую сварку для золотой проволоки диаметром 20–35 мкм (рис. 8). Технология ультразвуковой сварки представляет собой соединение деталей под воздействием ультразвуковых волн, которые преобразуются в механические колебания и вызывают пластическую деформацию плоскостей в месте их соприкосновения, одновременно разрушая оксидные пленки. Свойства металлов почти не изменяются. Электричество преобразуется в звук высокой частоты, необходимый для сварки, головка обеспечивает сжатие рабочих деталей, волноводы передают энергию в ту точку, где сваривают поверхности.

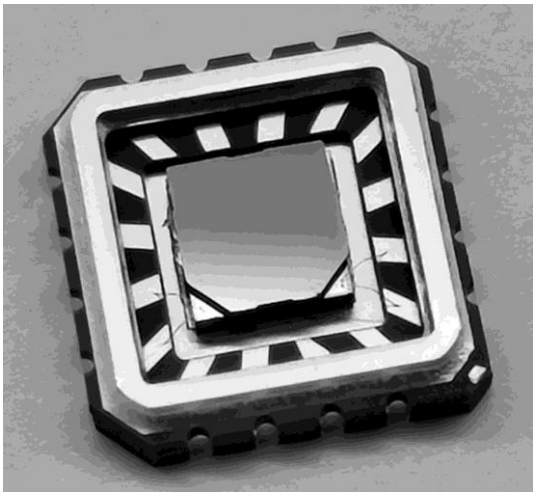


Рис. 8. Датчик удара без крышки
Fig. 8. Impact sensor without cover

Разработанная конструкция и отработанные режимы технологических операций позволили изготовить микромеханический датчик удара с размерами кристалла 3,2 × 3,2 мм, размеры датчика в корпусе 7,6 × 7,6 мм. Уровень срабатывания датчика может быть изготовлен в диапазоне 0,5–200 *g*.

Заключение. Разработанная конструкция и отработанные режимы технологических операций позволили изготовить чувствительный элемент микромеханического датчика удара серии КМГ-1. Проведенные испытания подтвердили его работоспособность.

Материалы статьи доложены на Российском форуме «Микроэлектроника 2022» (2–8 октября 2022 г., г. Сочи).

Литература

1. Особенности конструкции и технологии изготовления чувствительного элемента микроакселерометра / ***С. П. Тимошенков, В. В. Калугин, С. А. Анчутин и др.*** // Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 480–483. https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.480.483. – EDN: ZHEYCT.

2. ***Готра З. Ю.*** Технология микроэлектронных устройств: справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.

3. ***Скупов А.*** Анодная и непосредственная сварка пластин для микроэлектроники // Вектор высоких технологий. 2015. № 5 (18). С. 36–44.

4. Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра / ***Е. С. Кочурина, С. А. Анчутин, В. В. Калугин и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 59–67. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67. – EDN: JPSKAX.

5. Разработка и исследование МЭМС-акселерометра / ***Е. С. Кочурина, С. А. Анчутин, А. С. Мусаткин и др.*** // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № S8-1 (113). С. 235–238. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.235.238. – EDN: NAVGJZ.

6. Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silicon structures / ***M. A. Blauw, G. Craciun, W. G. Sloof et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. Vol. 20. Iss. 6. P. 3106–3110. https://doi.org/10.1116/1.1518018

7. Оптимизация параметров процесса глубокого плазмохимического травления кремния для элементов МЭМС / ***А. И. Виноградов, Н. М. Зарянкин, Е. П. Прокопьев и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 2 (82). С. 3–9. EDN: LMCYJB.

8. Standing wave and skin effects in large-area, high-frequency capacitive discharges / ***M. A. Lieberman, J. P. Booth, P. Chabert et al.*** // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. Vol. 11. No. 3. P. 283–293. https://doi.org/10.1088/0963-0252/11/3/310

9. ***Берлин Е., Двинин С., Морозовский Н., Сейдман Л.*** Реактивное ионно-плазменное травление и осаждение. Установка «Каролина 15» // Электроника: наука, технология, бизнес. 2005. № 8. С. 78–80. EDN: NXTCSJ.

10. ***Григорьев Ю. Н., Горобчук А. Г.*** Численная оптимизация плазмохимического реактора // Вычислительные технологии. 1997. Т. 2. № 6. С. 12–23. EDN: KYRBUR.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 04.09.2023 г.;
принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Кочурина Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), главный метролог ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), ekochurina@mp-lab.ru

Виноградов Анатолий Иванович – технолог Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), технолог ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), avinogradov@mp-lab.ru

Боев Леонид Романович – инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), lboev@mp-lab.ru

Зарянкин Николай Михайлович – кандидат технических наук, ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ведущий инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), nzaryankin@mp-lab.ru

Анчутин Степан Александрович – ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ведущий инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), step@mail.ru

Дернов Илья Сергеевич – инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), i.s.dernov@yandex.ru

Тимошенков Алексей Сергеевич – доктор технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), генеральный директор ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), at@mp-lab.ru

Тимошенков 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. Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Anchutin S. A., Zariankin N. M., Kochurina E. S. Features of designing and manufacturing a microaccelerometer sensing device. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2019, no. S (89), pp. 480–483. (In Russian). https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.480.483. – EDN: ZHEYCT.

2. Gotra Z.Yu. *Technology of microelectronic devices,* reference book. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 528 p. (In Russian).

3. Skupov A. Anodic and direct wafer bonding for microelectronics. *Vektor vysokikh tekhnologiy*, 2015, no. 5 (18), pp. 36–44. (In Russian).

4. Kochurina E. S., Anchutin S. A., Kalugin V. V., Zaryankin N. M., Timoshenkov A. S., Dernov I. S. Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 59–67. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67. – EDN: JPSKAX.

5. Kochurina E. S., Anchutin S. A., Musatkin A. S., Dernov I. S., Timoshenkov A. S., Polushkin V. M., Timoshenkov S. P. Research and development of a MEMS-accelerometer. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2022, vol. 15, no. S8-1 (113), pp. 235–238. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.235.238. – EDN: NAVGJZ.

6. Blauw M. A., Craciun G., Sloof W. G., French P. J., Drift E. van der. Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silicon structures. *J. Vac. Sci. Technol. B,* 2002, vol. 20, iss. 6, pp. 3106–3110. https://doi.org/10.1116/1.1518018

7. Vinogradov A. I., Zaryankin N. M., Prokopiev E. P., Timoshenkov S. P., Mikhailov Yu. A. Optimization of parameters of plasmachemical process of silicon etching for MEMS elements. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2010, no. 2 (82), pp. 3–9. (In Russian). EDN: LMCYJB.

8. Lieberman M. A., Booth J. P., Chabert P., Rax J. M., Turner M. M. Standing wave and skin effects in large-area, high-frequency capacitive discharges. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2002, vol. 11, no. 3, pp. 283–293. https://doi.org/10.1088/0963-0252/11/3/310

9. Berlin E., Dvinin S., Morozovskiy N., Seydman L. Reactive ion-plasma etching and deposition. System "Caroline 15". *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2005, no. 8 (66), pp. 78–80. (In Russian). EDN: NXTCSJ.

10. Grigoryev Yu. N., Gorobchuk A. G. Numerical optimization of plasma-chemical etching reactor. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies,* 1997, vol. 2, no. 6, pp. 12–23. (In Russian). EDN: KYRBUR.

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 04.09.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Elena S. Kochurina – 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), Chief Metrologist, "Laboratory of Micro-Devices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), ekochurina@mp-lab

Anatoliy I. Vinogradov – Technologist of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Technologist, "Laboratory of Micro-Devices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), avinogradov@mp-lab.ru

Leonid R. Boev – Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Laboratory of Micro-Devices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), lboev@mp-lab.ru

Nikolay M. Zaryankin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Laboratory of Micro-Devices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), nzaryankin@mp-lab.ru

Stepan A. Anchutin – Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Laboratory of Micro-Devices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), step@mail.ru

Ilya S. Dernov – Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Laboratory of Micro-Devices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), i.s.dernov@yandex.ru

Aleksey S. Timoshenkov – Dr. 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), General Manager, "Laboratory of Micro-Devices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), at@mp-lab.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

Уважаемые авторы!

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

Научная статья
УДК 681.586.5
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-89-97
EDN: XRDWEG

Определение температурной погрешности оптического датчика плотности электролита для аккумуляторов

А. Г. Борисов, Е. В. Ильяшева, Н. Г. Осипенкова

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

borisov_a.g@mail.ru

Аннотация. Для обеспечения надежной работы технической системы, в состав которой входит аккумулятор, важно контролировать емкость и степень заряженности аккумулятора. Поэтому необходимо постоянное измерение этих параметров как в процессе работы системы, так и в состоянии покоя. Один из методов оценки различных характеристик аккумулятора непосредственно в процессе работы – измерение степени заряженности по плотности электролита. В работе рассмотрен оптический рефрактометрический датчик, работа которого основана на зависимости потерь света в оптическом волноводе от показателя преломления среды, в которую этот волновод погружен. Подобраны оптимальные геометрические характеристики волновода. Установлена концентрация раствора серной кислоты в элементе, равная 31 вес. %, при которой наблюдается минимальная температурная погрешность датчика, позволяющая использовать его в промышленности.

Ключевые слова: датчик, волновод, степень заряженности, аккумулятор, температурная погрешность

Для цитирования: Борисов А. Г., Ильяшева Е. В., Осипенкова Н. Г. Определение температурной погрешности оптического датчика плотности электролита для аккумуляторов // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 89–97. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-89-97. – EDN: XRDWEG.

© А. Г. Борисов, Е. В. Ильяшева, Н. Г. Осипенкова, 2024

Original article

Determination of the temperature error of the optical electrolyte density sensor for batteries

A. G. Borisov, E. V. Ilyasheva, N. G. Osipenkova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

borisov_a.g@mail.ru

Abstract. Monitoring the capacity and state of charge of the battery is extremely important to ensure the reliable operation of the technical system that includes the battery, and therefore there is a need for constant measurement of these parameters, both during the operation of the system and at rest. One of the methods for estimating the various characteristics of the battery directly in the process of operation is the measurement of the state of charge by the electrolyte density. In this work, an optical refractometric sensor is considered, whose operation is based on the dependence of the amount of light loss in an optical waveguide on the refractive index of the medium in which this waveguide is immersed. The optimal geometric characteristics of the waveguide were selected. It is determined that the use of the differential measurement method does not provide full compensation for the effect of temperature on the signal of the considered sensor. It has been established that sulfuric acid concentration at which the sensor temperature error is minimal, allowing its industrial use, is 31 wt. %.

Keywords: sensor, waveguide, state of charge, battery, temperature error

For citation: Borisov A. G., Ilyasheva E. V., Osipenkova N. G. Determination of the temperature error of the optical electrolyte density sensor for batteries. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 89–97. https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2024-29-1-89-97. – EDN: XRDWEG.

Введение. Для работы большинства технических систем необходимы электрохимические аккумуляторы [1], среди которых широкое распространение получили свинцово-кислотные аккумуляторы ввиду их умеренной стоимости, увеличенного ресурса – более 500 циклов заряда / разряда, высокой удельной мощности [2, 3]. Основные параметры при оценке работоспособности аккумулятора на заданный момент времени – напряжение, емкость, степень заряженности (State of Charge, SOC). Контроль степени заряженности важен для обеспечения надежной работы технической системы, в состав которой входит аккумулятор, поэтому необходимо постоянное измерение этого параметра как в процессе работы системы, так и в состоянии ее покоя [4].

Цель настоящей работы – экспериментальная оценка температурной погрешности показаний рефрактометрического датчика плотности электролита и, соответственно, степени заряженности свинцово-кислотного аккумулятора.

Методы определения степени заряженности аккумуляторов. На сегодняшний день применяются два метода определения степени заряженности свинцово-кислотных аккумуляторов: по напряжению на клеммах и по плотности электролита. Изменение напряжения на клеммах аккумулятора на 0,1 В соответствует изменению степени заряженности на 10 %, изменение плотности электролита на 0,01 г/мл – изменению степени

заряженности на 5–6 % [5]. Напряжение на клеммах аккумулятора в режиме разряда, кроме всего прочего, зависит от тока, выдаваемого аккумулятором на нагрузку. Поэтому точно оценить степень заряженности по напряжению на клеммах можно только при полностью отключенном от системы аккумуляторе. Таким образом, данный метод неприменим или применим частично для оценки степени заряженности работающего аккумулятора [6]. Измерение степени заряженности по плотности электролита – более универсальный метод, так как позволяет достаточно точно оценивать этот параметр непосредственно в процессе работы аккумулятора [7]. Известно множество методов определения плотности электролита, на которых основана работа датчиков плотности. Существуют гидростатические, электрохимические, оптические датчики плотности, а также датчики, основанные на таких физико-химических свойствах электролитов, как зависимость скорости ультразвуковых волн, постоянной времени затухания свободных колебаний или коэффициента поглощения радиоактивного излучения от плотности среды. Такие датчики позволяют измерять плотность электролита, однако для оценки степени заряженности батареи подходят не все.

В категории оптических датчиков практический интерес представляет рефрактометрический датчик, в основе работы которого – зависимость потери света в оптическом волноводе от показателя преломления среды, в которую этот волновод погружен [8]. Для растворов серной кислоты, используемых в качестве электролита в свинцово-кислотных аккумуляторах, показатель преломления и плотность раствора зависят от концентрации кислоты в растворе и поэтому также связаны между собой функциональной линейной зависимостью. При использовании рефрактометрического датчика измерять плотность можно на разных уровнях и в разных местах внутри корпуса аккумулятора, что позволяет контролировать плотность электролита в режиме реального времени и во всем объеме аккумулятора в процессе заряда и/или разряда. Поскольку измерения проводят путем введения оптического волновода непосредственно в электролит внутри аккумулятора, то нет необходимости в использовании вспомогательных автоматизированных систем, обеспечивающих циркуляцию электролита или периодическое извлечение пробы электролита для проведения измерений. Эти системы имеют следующие недостатки: приводят к удорожанию измерений и усложнению конструкции, требуют дополнительного свободного места, являются возможным источником помех и погрешностей при измерении и в целом затрудняют процесс измерения.

Плотность и показатель преломления электролита существенно зависят от температуры. Поэтому для компенсации влияния температуры на показания датчика в настоящей работе применяли дифференциальный способ измерения сигнала датчика. Для этого использовали элемент сравнения, представляющий собой оптический волновод, помещенный в раствор серной кислоты, герметично изолированный от окружающей среды в теплопроводящем корпусе. Так как концентрация серной кислоты в элементе сравнения остается в процессе измерений постоянной, то сигнал на выходе элемента сравнения зависит только от температуры. Элемент сравнения располагали в электролите внутри корпуса аккумулятора рядом с датчиком плотности на одной и той же глубине. Соответственно сигнал датчика измеряли относительно сигнала элемента сравнения. Как показали предварительные эксперименты и результаты моделирования, такая схема измерений не обеспечивает полной температурной компенсации сигнала датчика.

Конструкция рефрактометрического датчика. Конструкция датчика предложена и рассмотрена теоретически в работах [2, 9]. Датчик состоит из чувствительного элемента и измерительного блока. Физический принцип действия чувствительного

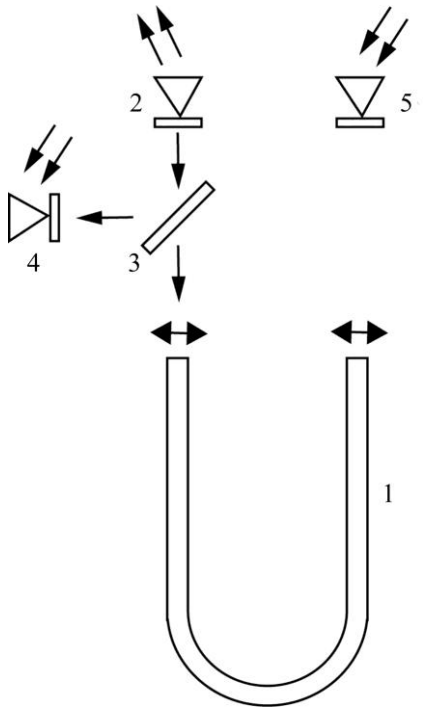


Рис. 1. Принципиальная схема чувствительного элемента датчика: 1 – изогнутый цилиндрический волновод из полиметилметакрилата; 2 – источник света; 3 – светоделительное устройство; 4 – опорный фотоприемник; 5 – измерительный фотоприемник

Fig. 1. Schematic diagram of the sensing element of the sensor: 1 – bent cylindrical waveguide of polymethyl acrilate; 2 – light source; 3 – light divider; 4 – reference photodetector; 5 – measuring photodetector

элемента датчика основан на том, что потери света в оптическом волноводе при прочих равных условиях зависят от показателя преломления среды, в которую он помещен. Измерительный блок датчика предназначен для цифровой обработки аналитического сигнала и определения по его значению показателя преломления жидкости и/или ее химического состава. Принципиальная схема чувствительного элемента датчика представлена на рис. 1.

Основу чувствительного элемента датчика составляет изогнутый цилиндрический волновод из полиметилметакрилата диаметром 0,5–10 мм, который помещен в исследуемую жидкость. Использование волноводов такого диаметра упрощает систему ввода-вывода излучения. Оптический волновод изогнут по радиусу $R = (1–25)d$ при длине прямых участков 60 мм. Оптимальные размеры волновода выбраны по результатам моделирования с использованием математической модели, описанной в работе [4].

Методика проведения эксперимента. В торец волновода через светоделительное устройство направляли свет от стабилизированного источника излучения. При этом часть исходного светового потока от светоделительного устройства попадает на вход опорного фотоприемника, закрепленного перпендикулярно оси волновода. На входном прямом и изогнутом участках волновода согласно законам Френеля в зависимости от показателя преломления исследуемой жидкости происходит уменьшение интенсивности светового потока из-за частичного вытекания света в окружающую среду. Свет, пройдя прямой выходной участок, который коллимирует оставшееся в волноводе излучение, попадает на выходной торец и регистрируется измерительным фотоприемником (см. рис. 1). Сигнал опорного фотоприемника применяется для поддержания постоянной интенсивности светового потока на входном торце волновода.

При использовании органического стекла для изготовления волновода чувствительного элемента отмечены как преимущества, так и недостатки. В частности, верхний диапазон измеряемого показателя преломления ограничен значением 1,492. Однако этого достаточно для измерения показателей преломления водных растворов серной кислоты любой концентрации. Высокая химическая устойчивость органического стекла позволяет использовать датчик для контроля химического состава таких агрессивных сред, как концентрированная серная кислота. Преимущества органического стекла обусловлены малыми внутренними потерями на рассеивание, что дает возможность реализовать максимальную чувствительность датчика.

В качестве источников света использовали светодиоды марки GNL-3012 ED (λ_{max} = 635 нм). Их подсоединяли к стабилизированному источнику питания, ток на вы-

ходе которого плавно регулировали и поддерживали с точностью ±0,1 %. В качестве опорного и измерительного фотоприемников применяли кремниевые фотодиоды марки ФД-256. Сигналы с фотоприемников поступали на вход измерительного блока. Для компенсации влияния температуры на показания датчика применяли дифференциальный способ измерения сигнала. С этой целью использовали элемент сравнения, представляющий собой аналогичный оптический волновод, помещенный в раствор серной кислоты постоянной концентрации и герметично изолированный от окружающей среды в теплопроводящем корпусе. В процессе обработки сигнал элемента сравнения автоматически вычитался из сигнала датчика. Элемент сравнения помещали в электролит и располагали рядом с датчиком на той же глубине.

Для проведения экспериментов готовили ряд растворов серной кислоты разной концентрации в диапазоне 20–42 вес. % в соответствии с ГОСТ Р МЭК 62877-1-2019 [10]. Верхний предел выбранного диапазона определяли содержанием серной кислоты, приблизительно соответствующим максимально заряженному состоянию аккумулятора, а нижний – полностью разряженному состоянию. Плотность растворов контролировали ареометром в соответствии с ГОСТ 18995.1-73 [11]. Показатель преломления растворов при 20 °С измеряли с использованием стандартного рефрактометра ИРФ-495. Для определения температурной погрешности датчика его чувствительный элемент и элемент сравнения помещали в заполненную серной кислотой заданной концентрации измерительную ячейку, которую, в свою очередь, помещали в термостат. Измерения проводили при температурах 10, 20, 30 °С. Для термостатирования использовали термостат марки Termex КРИО-ВИС-Т-07, температуру в ячейке поддерживали с точностью не менее 0,05 °С. Устройство термостата позволяет измерять плотность раствора в термостатируемом объеме обычным ареометром. Для каждого выбранного раствора и значения температуры определяли не менее 10 показаний выходного сигнала датчика. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программного продукта Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. ***Выбор геометрических параметров волновода.*** Метрологические характеристики рассматриваемого датчика существенно зависят от таких геометрических параметров, как радиус волновода r и радиус его изгиба R, а также от соотношения этих величин. С целью оптимизации данных характеристик проведено моделирование для разных конфигураций оптического волновода. Для этого в соответствии с моделью, описанной в работе [4], разработана программа и проведен расчет передаточной функции для трех оптических волноводов с постоянным соотношением $R/r = 4$, значениями r в диапазоне 0,5–2,5 мм и R в диапазоне 2–10 мм. Выбор диапазона обусловлен требуемыми массогабаритными характеристиками датчика. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

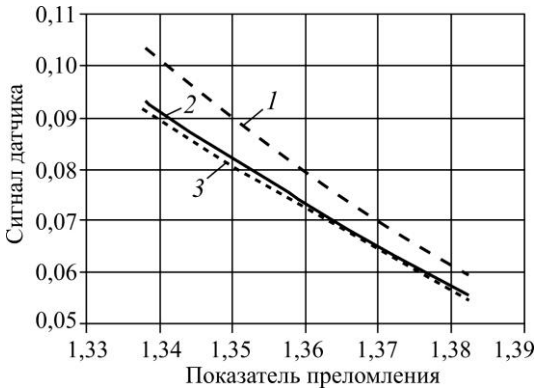


Рис. 2. Зависимость сигнала датчика от показателя преломления при разных радиусах волновода r и его изгиба R: кривая *1* – r = 0,5 мм, R = 2 мм; кривая *2* – r = 1 мм, R = 4 мм; кривая *3* – r = 2,5 мм, R = 10 мм

Fig. 2. Dependence of sensor signal on refractive index at different waveguide radii r and its bending radii R: curve *1* – r = 0.5 mm, R = 2 mm; curve *2* – r = 1 mm, R = 4 mm; curve *3* – r = 2.5 mm, R = 10 mm

Выходной сигнал датчика уменьшается при увеличении показателя преломления,

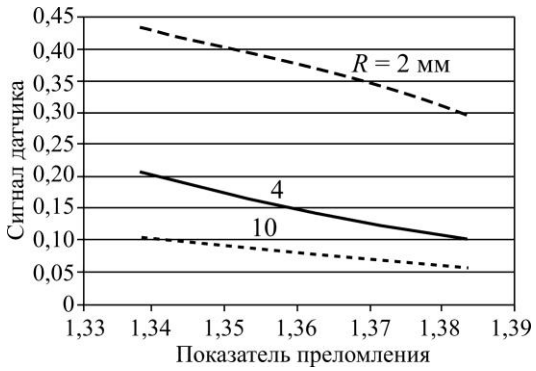


Рис. 3. Зависимость сигнала датчика от показателя преломления при разных радиусах изгиба волновода R и r = 0,5 мм

Fig. 3. Dependence of sensor signal on refractive index at different bending radii of waveguide R with waveguide radius r = 0.5 mm

следовательно, и плотности раствора. Все протестированные радиусы демонстрируют аналогичное поведение. Однако разность значений выходного сигнала между наиболее и наименее плотным раствором зависит от радиуса волновода. Поскольку коэффициент чувствительности датчика определяется как первая производная dy/dn, то оптимальным считается радиус, обеспечивающий наибольшую разность значений выходного сигнала датчика между наиболее и наименее плотной средой, т. е. наиболее чувствительный радиус в ожидаемом диапазоне плотностей электролита. Кроме того, этот волновод обеспечивает максимальный диапазон изменения выходного сигнала. Исходя из этого для дальнейших исследований выбран волновод радиусом 0,5 мм, для которого смоделированы зависимости сигнала датчика от радиуса изгиба волновода (рис. 3).

Максимальная разность значений выходного сигнала датчика ΔU зафиксирована для радиуса изгиба волновода, равного 10 мм (см. рис. 3). В этом случае наблюдается максимально приближенная к линейной зависимость сигнала датчика от показателя преломления, следовательно, и от плотности раствора. Для дальнейших исследований выбран волновод со следующими геометрическими характеристиками: r = 0,5 мм, R = 10 мм.

Определение температурной погрешности датчика. С использованием датчика выбранной конфигурации проведено исследование зависимости сигнала датчика от плотности электролита при разных температурах (рис. 4). Из рисунка следует, что используемый дифференциальный способ измерения не позволяет в полной мере

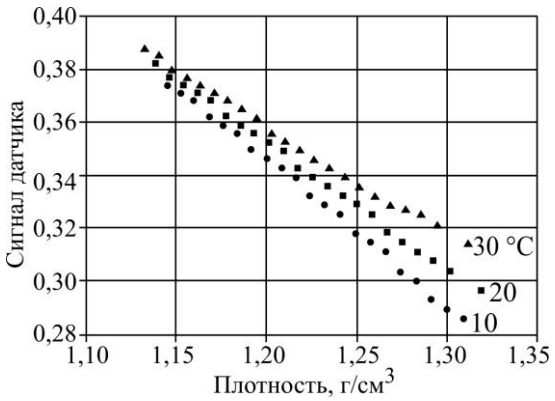


Рис. 4. Зависимость сигнала датчика от плотности электролита при разных температурах при r = 0,5 мм, R = 10 мм

Fig. 4. Dependence of sensor signal on electrolyte density at different temperatures with r = 0.5 mm, R = 10 mm

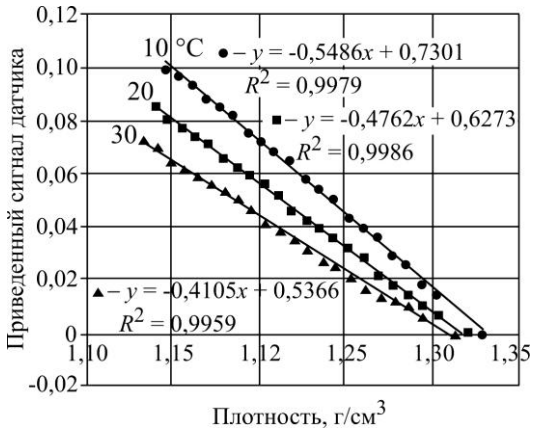


Рис. 5. Зависимость приведенного (концентрация раствора в элементе сравнения 42 вес. %) сигнала датчика от плотности электролита при разных температурах при r = 0,5 мм, R = 10 мм

Fig. 5. Dependence of scaled (solution concentration in the comparison element is 42 wt. %) sensor signal on electrolyte density at different temperatures with r = 0.5 mm, R = 10 mm

компенсировать зависимость сигнала оптического датчика от температуры измерений. Наиболее значительные расхождения – вблизи максимума исследуемых концентраций. Поэтому для расчета температурной погрешности исследована зависимость приведенного сигнала датчика от плотности электролита. Расчет приведенного сигнала проводили вычитанием сигнала датчика для концентрации 42 вес. % из показаний датчика для всех остальных плотностей для каждой температуры (рис. 5).

По данным измерений сигнала датчика для раствора с концентрацией 42 вес. %, что соответствует состоянию полностью заряженного аккумулятора, разность плотностей при температурах 20 и 30 °С составляет 0,01012 г/см^3. Это дает относительную погрешность измерений в степени заряженности аккумулятора порядка 0,61 % на 1 °С при температуре 30 °С. Разность плотностей при температурах 10 и 20 °С составляет 0,01354 г/см^3, что дает погрешность измерения в степени заряженности порядка 0,81 % на 1 °С при температуре 10 °С. Те же расчеты для раствора с концентрацией 20 вес. % (соответствует практически полной разрядке аккумулятора) дают 2,02 и 1,98 % на 1 °С при температуре 30 и 10 °С соответственно. При этом средняя погрешность измерений в выбранном диапазоне концентраций и температур составляет 1,35 % на 1 °С, максимальная – 2,02 % на 1 °С.

Исходя из рис. 6, температурная погрешность линейно возрастает при уменьшении плотности раствора. Поэтому для уменьшения погрешности предложено в элементе сравнения использовать раствор кислоты с концентрацией 31 вес. %. Из полученных данных следует, что при использовании в качестве элемента сравнения датчика, помещенного в раствор серной кислоты с концентрацией 31 вес. %, максимальная абсолютная температурная погрешность составляет 0,0018 г/см^3, а средняя абсолютная температурная погрешность составляет 0,0014 г/см^3 на 1 °С. В пересчете на степень заряженности максимальная температурная погрешность составляет 1 %, средняя – 0,8 % на 1 °С.

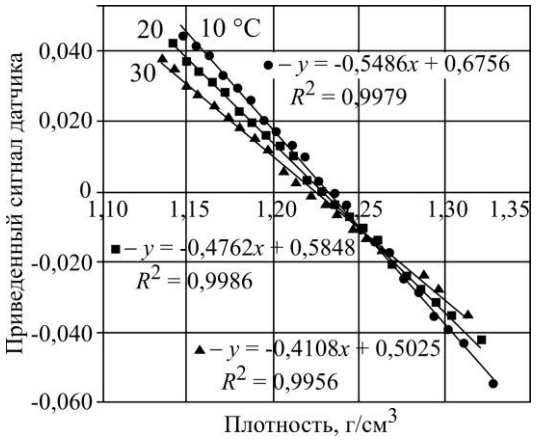


Рис. 6. Зависимость приведенного (концентрация раствора в элементе сравнения 31 вес. %) сигнала датчика от плотности электролита при разных температурах при r = 0,5 мм, R = 10 мм
Fig. 6. Dependence of scaled (solution concentration in the comparison element is 31 wt. %) sensor signal on electrolyte density at different temperatures with r = 0.5 mm, R = 10 mm

Заключение. Проведенные исследования показали, что использование дифференциального метода измерений не обеспечивает полной компенсации влияния температуры на сигнал оптического рефрактометрического датчика плотности. В результате рассчитанной температурной погрешности датчика установлено, что минимальная температурная погрешность наблюдается в том случае, когда концентрация раствора серной кислоты в элементе сравнения составляет 31 вес. %. Нескомпенсированная температурная погрешность оптического рефрактометрического датчика мала, что позволяет использовать его в промышленности.

Литература

1. ***Pillot C.*** The worldwide battery market 2012–2025: conference paper for Batteries 2013 (Oct. 14–16, 2013, Nice, France) // Avicenne Energy [Электронный ресурс]. URL: https://www.avicenne.com/pdf/The%20worldwide%20battery%20market%202012-2025%20C%20Pillot%20BATTERIES%202013%20Nice%20October%202013.pdf (дата обращения: 13.11.2023).

2. ***May G. J., Davidson A., Monahov B.*** Lead batteries for utility energy storage: A review // J. Energy Storage. 2018. Vol. 15. P. 145–157. https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008

3. ***Кулова Т. Л., Николаев И. И., Фатеев В. Н., Алиев А. Ш.*** Современные электрохимические системы аккумулирования энергии // Kimya Problemləri. 2018. Т. 16. № 1. С. 9–34. EDN: YTXKQG.

4. ***Degla A., Chikh M., Mzir M., Belabed Y.*** The state of charge estimating methods for rechargeable lead-acid batteries // 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Sétif: IEEE, 2022. P. 496–502. https://doi.org/10.1109/SSD54932.2022.9955864

5. ***Юмт В. Е.*** Электрооборудование автомобилей: учебник для студ. автомобильных специальностей вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 440 с.

6. ***Юров Ю. Ю., Постников А. А., Гумелёв В. Ю.*** Краткая оценка методов диагностирования свинцово-кислотных аккумуляторных батарей // Современная техника и технологии. 2015. № 12 (52). С. 92–102. EDN: VHUBJB.

7. A multi-point sensor based on optical fiber for the measurement of electrolyte density in lead-acid batteries / ***A. M. Cao-Paz, J. Marcos-Acevedo, A. del Río-Vázquez et al.*** // Sensors. 2010. Vol. 10. Iss. 4. P. 2587–2608. https://doi.org/10.3390/s100402587

8. Рефрактометрия жидкостей с помощью световода / ***А. Г. Борисов, Г. В. Волкова, В. А. Ганьшин и др.*** // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 9. С. 9–13.

9. Математическое моделирование распространения света в изогнутых цилиндрических волноводах / ***В. А. Анисимов, А. Г. Борисов, Г. В. Волкова и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2005. № 1. С. 35–41. EDN: HZNEKF.

10. ГОСТ Р МЭК 62877-1–2019. Электролиты и вода для вентилируемых свинцово-кислотных аккумуляторов. Ч. 1: Требования к электролиту. М.: Стандартинформ, 2019. III, 8 с.

11. ГОСТ 18995.1–73. Продукты химические жидкие. Методы определения плотности. М.: Изд-во стандартов, 1998. 6 с.

Статья поступила в редакцию 24.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.08.2023 г.;
принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Борисов Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), borisov_a.g@mail.ru

Ильяшева Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), evbox73@mail.ru

Осипенкова Наталья Геннадиевна – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), osipenkova@mail.ru

References

1. Pillot C. The worldwide battery market 2012–2025, conference paper for Batteries 2013 (Oct. 14–16, 2013, Nice, France). *Avicenne Energy*. Available at: https://www.avicenne.com/pdf/The%20worldwide%20battery%20market%202012-2025%20C%20Pillot%20BATTERIES%202013%20Nice%20October%202013.pdf (accessed: 13.11.2023).

2. May G. J., Davidson A., Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: A review. *J. Energy Storage*, 2018, vol. 15, pp. 145–157. https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008

3. Kulova T. L., Nikolaev I. I., Fateev V. N., Aliyev A. Sh. Modern electrochemical systems of energy accumulation. *Kimya Problemləri*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 9–34. (In Russian). EDN: YTXKQG.

4. Degla A., Chikh M., Mzir M., Belabed Y. The state of charge estimating methods for rechargeable lead-acid batteries. *2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD).* Sétif, IEEE, 2022, pp. 496–502. https://doi.org/10.1109/SSD54932.2022.9955864

5. Yutt V. E. *Electrical equipment of cars*, textbook for automobile specialties of universities. 4th ed., rev. and upd. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2009. 440 p. (In Russian).

6. Yurov Yu. Yu., Postnikov A. A., Gumelev V. Yu. A brief assessment of methods of diagnosing lead-acid batteries. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii = Modern technics and technologies*, 2015, no. 12 (52), pp. 92–102. (In Russian). EDN: VHUBJB.

7. Cao-Paz A. M., Marcos-Acevedo J., Río-Vázquez A. del, Martínez-Peñalver C., Lago-Ferreiro A., Nogueiras-Meléndez A. A., Doval-Gandoy J. A multi-point sensor based on optical fiber for the measurement of electrolyte density in lead-acid batteries. *Sensors*, 2010, vol. 10, iss. 4, pp. 2587–2608. https://doi.org/10.3390/s100402587

8. Borisov A. G., Gan'shin V. A., Volkova G. V., Krutovertsev S. A., Sudakov D. E. Refractometry of liquids using a lightguide. *J. Opt. Technol.*, 2003, vol. 70, iss. 9, pp. 628–632. https://doi.org/10.1364/JOT.70.000628

9. Anisimov V. A., Borisov A. G., Volkova G. V., Kozlitin I. A., Krutovertsev S. A. Mathematical modeling of light distribution in bent cylindrical waveguides. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2005, no. 1, pp. 35–41. (In Russian). EDN: HZNEKF.

10. GOST R MEK 62877-1–2019. *Electrolytes and water for vented lead acid accumulators. Pt. 1. Requirements for electrolyte (IEC 62877-1:2016, IDT).* Moscow, Standartinform Publ., 2019. iii, 8 p. (In Russian).

11. GOST 18995.1–73. *Liquid chemical products. Methods for determination of density.* Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1998. 6 p. (In Russian).

The article was submitted 24.04.2023; approved after reviewing 15.08.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Alexander G. Borisov – 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), borisov_a.g@mail.ru

Ekaterina V. Ilyasheva – 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), evbox73@mail.ru

Natalia G. Osipenkova – 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), osipenkova@mail.ru

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

Научная статья
УДК 621.3.049.76: 621.396.6
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-98-107
EDN: RLFKBJ

Разработка и исследование многокристальных микросистем на основе модульной трехмерной интеграции кристаллов

Е. Ю. Чугунов, С. П. Тимошенков, А. И. Погалов

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

dtm@miee.ru

Аннотация. В настоящее время подход к созданию электронной компонентной базы с высокой степенью интеграции на основе трехмерных многокристальных микросистем интенсивно развивается и реализуется в таких направлениях, как многоуровневая упаковка корпусированных микросхем, бескорпусных микросхем и полупроводниковых структур. Данный подход заключается в штабелировании набора кристаллов в трехмерные многокристальные модули и имеет ряд преимуществ по сравнению с двумерными конструкциями за счет большей функциональной плотности и эффективности размещения и монтажа компонентов. В работе проведены исследования многокристальных микросистем при различных воздействующих факторах. Показано существенное влияние физико-механических свойств материалов и конструктивно-технологических решений на прочность изделий. Установлено, что обеспечение надежности создаваемой электронной компонентной базы, направленное на уменьшение числа отказов и повреждений, повышение устойчивости к механическим, температурным и другим воздействиям, достигается при соблюдении комплекса выработанных научно-технических рекомендаций. Проведен рациональный подбор материалов для многокристальных микросистем на основе модульной трехмерной интеграции кристаллов. Выработан критерий оценки долговечности проводников с учетом линейного упрочнения материала и пластической деформации в цикле нагружения. Комплексный инженерный расчет с проведением моделирования на основе метода конечных элементов позволяет учесть совокупность конструктивных, технологических и эксплуатационных аспектов разработки электронной компонентной базы, сократить число ошибок при проектировании, найти рациональные технические решения. Моделирование обеспечивает поиск вариантов равномерного распределения нагрузки на элементы и соединения изделий, уменьшения изгибных, крутильных, температурных и монтажных деформаций, уравновешивания инерционных нагрузок, повышения запасов прочности и выносливости материалов и соединений.

Ключевые слова: электронная компонентная база, многокристальные микросистемы, модульная трехмерная интеграция кристаллов, конечно-элементное моделирование

© Е. Ю. Чугунов, С. П. Тимошенков, А. И. Погалов, 2024

Для цитирования: Чугунов Е. Ю., Тимошенков С. П., Погалов А. И. Разработка и исследование многокристальных микросистем на основе модульной трехмерной интеграции кристаллов // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 98–107. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-98-107. – EDN: RLFKBJ.

Original article

Development and research of multichip microsystems based on modular three-dimensional integration of chips

E. Yu. Chugunov, S. P. Timoshenkov, A. I. Pogalov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

dtm@miee.ru

Abstract. The approach to highly-integrated electronic component base development based on three-dimensional (3D) multichip microsystems is currently intensely progressing and implementing in such directions as multilevel packaging of packaged microchips, unpackaged microchips and semiconductor structures. The given approach consists in stacking up chip set in 3D multichip modules and has a variety of advantages compared with 2D-constructions due to higher functional density and efficiency of chip placement and mounting. In this work, researches of multichip microsystems on exposure to various action factors are carried out. The significant impact of materials' physical mechanical properties and structural-and-technological solutions on product strength was shown. It has been established that ensuring the reliability of electronic component base under formation, targeted at reducing the number of failures and damage and increasing resistance to mechanical, temperature and other actions is assured by observing a set of developed scientific and technical recommendations. A criterion of conductor durability evaluation with account for linear hardening of the material and plastic strain in loading cycle has been elaborated. A comprehensive engineering calculation with simulation based on the finite-element method allows considering the totality of structural, technological and operational aspects of the electronic component base development, reducing the number of design errors, and finding rational technical solutions. Simulation provides a search for options for uniform load distribution on product elements and joints, reduction of bending, torsional, temperature and mounting deformations, inertial loads balance, and increase in strength and endurance of materials and joints.

Keywords: electronic component base, multichip microsystems, modular three-dimensional integration of chips; finite-element modeling

For citation: Chugunov E. Yu., Timoshenkov S. P., Pogalov A. I. Development and research of multichip microsystems based on modular three-dimensional integration of chips. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 98–107. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-98-107. – EDN: RLFKBJ.

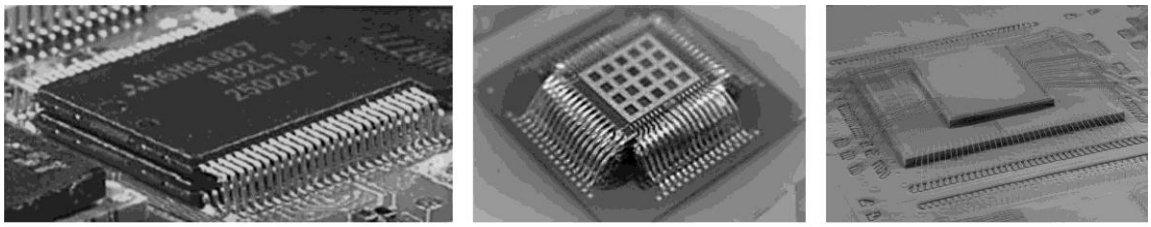
Введение. Рост функциональных возможностей, повышение степени интеграции и надежности, снижение габаритов и массы конструкций, улучшение других тактико-технических характеристик создаваемой электронной техники требуют совершенствования и разработки новых подходов к созданию высокоинтегрированной электронной

компонентной базы (ЭКБ) и технологий ее изготовления. Так, увеличение функциональной плотности и уменьшение топологических норм на уровне интегральных микросхем обеспечивают реализацию многофункциональных систем на кристалле. Такие системы, физически выполняемые в виде одного кристалла, могут реализовывать функции, эквивалентные многокристальным микросистемам (МКМ) [1–3].

Системы на кристалле изготавливаются по прогрессивным топологическим нормам и имеют ряд преимуществ, особенно в степени интеграции, по сравнению с набором отдельных микросхем в составе МКМ с той же функциональностью. Однако создание ЭКБ на основе систем на кристалле часто технически невозможно или экономически неоправданно с точки зрения функционально-стоимостных показателей. В таких случаях целесообразен переход к построению систем в корпусе, в которых кристаллы, функционально объединенные в МКМ, размещаются и упаковываются в одном корпусе. К существенному недостатку систем в корпусе относится преимущественно двумерная компоновка кристаллов, что приводит к росту дезинтеграции при монтаже [4].

Эффективным подходом к созданию ЭКБ с высокой степенью интеграции компонентов является разработка и конструирование МКМ на основе модульной трехмерной интеграции кристаллов. Этот подход заключается в штабелировании набора кристаллов в трехмерные многокристальные модули и реализует ряд преимуществ по сравнению с двумерными конструкциями за счет большей функциональной плотности и лучшей эффективности размещения и монтажа кристаллов. Рост степени интеграции МКМ за счет уплотненной трехмерной упаковки микросхем обусловливает снижение массогабаритных параметров, повышение быстродействия, эксплуатационной надежности и ряда других характеристик изделий [5].

Конструктивно-технологические направления создания трехмерных МКМ. В условиях микроминиатюризации подход к созданию ЭКБ на основе трехмерных МКМ получил интенсивное развитие и реализуется в таких направлениях, как многоуровневая упаковка корпусированных микросхем, бескорпусных микросхем, полупроводниковых структур (рис. 1).



а ***б*** ***в***

Рис. 1. Трехмерные МКМ на базе многоуровневой упаковки: *а* – корпусированные микросхемы; *б* – бескорпусные микросхемы; *в* – полупроводниковые структуры

Fig. 1. Three-dimensional multichip microsystems based on multilevel packaging: *a* – package on package; *b* – die stacked; *c* – wafer stacked

Особенностями МКМ являются применение разнородных материалов в элементах и соединениях модулей, а также интеграция комбинированных конструктивно-технологических решений в единые функционально оформленные модули с максимально высокой плотностью объемной упаковки кристаллов (рис. 2). При этом, несмотря на разнообразие решений по созданию МКМ, остаются актуальными следующие задачи: обеспечение высокоплотной упаковки кристаллов в составе трехмерных МКМ с минимизацией дезинтеграции при монтаже; обеспечение надежной межуровневой коммутации с минимальным числом монтажных соединений; обеспечение механической прочности и тепловых режимов трехмерных конструкций [4–6].

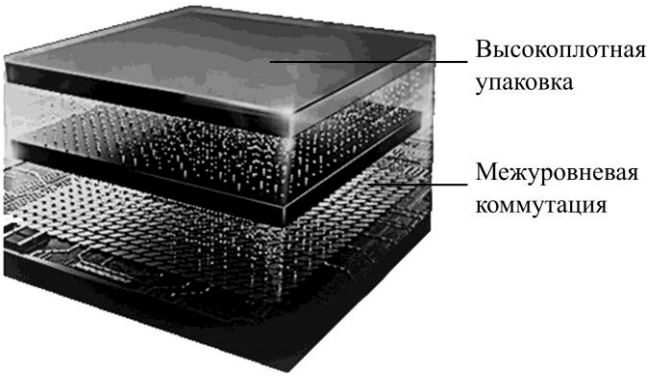
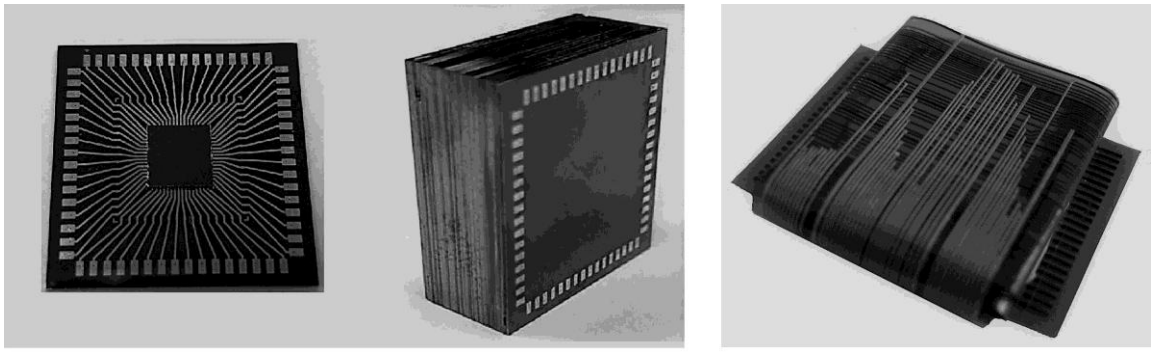


Рис. 2. Эскизный вид конструкции трехмерной МКМ
с разнесенными составными элементами
Fig. 2. Sketch view of a three-dimensional multichip microsystem
with spaced components

Для нивелирования конструктивных недостатков имеющихся решений выработаны такие виды исполнения МКМ, как модульная трехмерная интеграция бескорпусной ЭКБ на основе кремниевых интерпозеров (рис. 3, *а*) и гибких коммутационных плат (рис. 3, *б*). Интерпозеры и платы имеют контактные площадки для монтажа кристаллов и систему проводников для межуровневого коммутационного соединения смонтированных кристаллов. Отличительная особенность сложнопрофильных гибких плат с симметрично и попарно расположенными монтажными и боковыми выступами для установки и планарного монтажа кристаллов – доступность трехмерной сборки МКМ без проведения дополнительных монтажных операций [7, 8].



а ***б***

Рис. 3. Модульная трехмерная интеграция бескорпусной ЭКБ на основе кремниевых интерпозеров (*а*)
и гибких коммутационных плат (*б*)
Fig. 3. Modular three-dimensional integration of unpackaged electronic components based on silicon
interposers (*a*) and on flexible switching boards (*b*)

Разработка и моделирование трехмерных конструкций МКМ. Основные задачи разработки и конструирования трехмерных МКМ направлены на нахождение решений, которые обеспечивают надежность создаваемых конструкций за счет уменьшения числа отказов и повреждений, а также устойчивость к механическим, температурным и другим воздействиям. Разнородность физико-механических свойств материалов, комбинированных в конструкциях трехмерных МКМ, приводит к возникновению механических деформаций и напряжений при изготовлении и эксплуатации модулей. В тех случаях, когда механические напряжения могут достигать пределов прочности материалов или их сопряжений, происходит разрушение конструктивных элементов или соединений.

Учесть совокупность конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, сократить число ошибок при проектировании, найти рациональные технические решения позволяет комплексный инженерный расчет, включающий в себя моделирование изделий на основе метода конечных элементов [9]. Проведенные авторами настоящей статьи инженерный расчет и компьютерное моделирование конструкций учитывали механические, физические, тепловые свойства материалов, конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы, влияющие на силовую нагрузку, характер ее распределения, концентрацию напряжений и деформаций, выносливость изделий. Задачами моделирования являлись поиск вариантов равномерного распределения нагрузки на элементы и соединения изделий, уменьшения изгибных, крутильных, температурных и монтажных деформаций, уравновешивания инерционных нагрузок, повышения запасов прочности и выносливости материалов и соединений.

При разработке конечно-элементных моделей проводили аппроксимацию исследуемых конструкций путем исключения несущественных деталей, редукции сложных элементов [10]. На этапе аппроксимации конструкций закладывали наиболее важные факторы и характеристики изделий, выбирали геометрию моделей, строили сетку конечных элементов, задавали граничные условия и воздействия. Анализ конструкций показал, что в трехмерных структурах МКМ широко используются пластины из кремния, керамики, металлов и других материалов толщиной 0,1–5 мм, тонколистовые и пленочные материалы толщиной 10–500 мкм, клеи-герметики толщиной 50–300 мкм, проволока диаметром 30–60 мкм. На рис. 4 показана выработанная аппроксимированная конечно-элементная модель трехмерных МКМ, параметры которой варьируются для изучения различных конструктивно-технологических вариантов изделий и влияния воздействий на них. Физико-механические свойства основных использованных в модели материалов приведены в таблице [7, 11, 12].

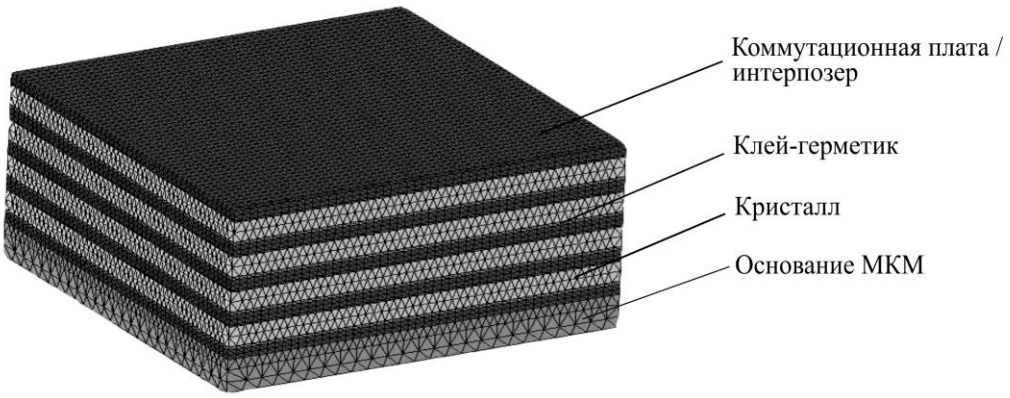


Рис. 4. Унифицированная компьютерная модель трехмерных МКМ с конечно-элементной дискретизацией для изучения конструктивно-технологических вариантов изделий и их устойчивости к различным воздействиям

Fig. 4. Unified computer model of three-dimensional multichip microsystems with finite-element discretization for the study of structural and technological variants of products and their stability to various impacts

Физико-механические свойства основных материалов модели трехмерных МКМ
Physical and mechanical properties of the basic materials of the model of three-dimensional multichip microsystems

Материал	Модуль упругости, МПа	ТКЛР*, $\alpha \cdot 10^6$, °C^{-1}	Допустимые напряжения, МПа	Коэффициент Пуассона
Соединяемые материалы				
Кремний	$1{,}3 \cdot 10^5$	4,2	200	0,3
Полиимид	$3 \cdot 10^3$	20	175	0,3
Алюминий	$7 \cdot 10^4$	22	150	0,33
Клеевые материалы				
Полиамидно-эпоксидный клей-герметик марки «ВК-9»	$2{,}8 \cdot 10^3$	72	30	0,3
Эпоксидный клей-герметик марки «ЦМК-ТП»	$3 \cdot 10^2$	70	8	0,35
Кремний-органический клей-герметик марки «СИЭЛ 159-406 М»	14	60	5	0,35

*ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения.

Исследования и моделирование МКМ направлены на получение с последующим сравнительным анализом значений напряжений в материалах при различных воздействиях в зависимости от конструктивно-технологического исполнения модулей и установления характера их распределения. В частности, при конструировании МКМ возникла необходимость обеспечения механической прочности и тепловых режимов изделий. Для решения данной проблемы проведено моделирование напряженно-деформированного состояния и определено влияние конструктивных параметров трехмерных МКМ на прочностные характеристики модулей в зависимости от свойств конструкционных материалов, характеристик сопряжений, условий эксплуатации и других факторов (рис. 5).

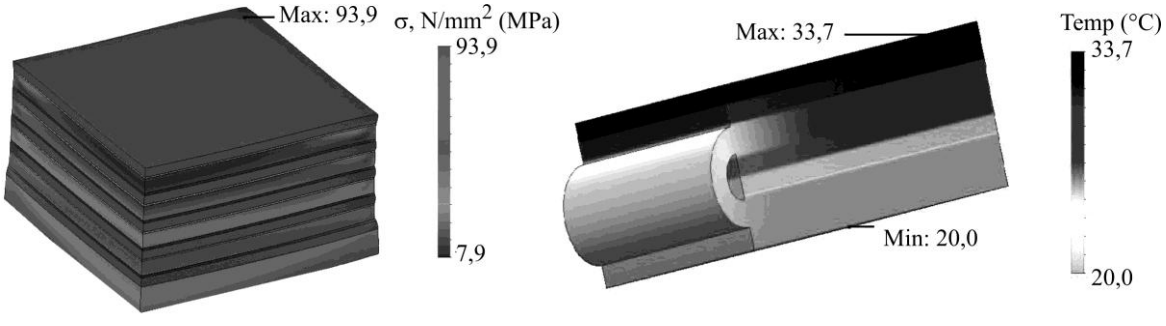


Рис. 5. Моделирование напряженно-деформированного состояния трехмерных МКМ при механических (*а*) и тепловых (*б*) воздействиях
Fig. 5. Modeling of the stress-strain state of three-dimensional multichip microsystems under mechanical (*a*) and thermal (*b*) impacts

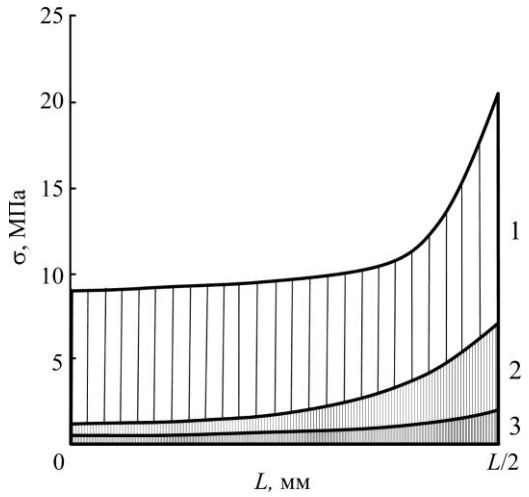


Рис. 6. Эпюры термомеханических напряжений σ по длине клеевых соединений *L* от центра к краям трехмерных МКМ для разных клеевых материалов (показано в сечении швов по оси симметрии *L*/2): 1 – полиамидно-эпоксидный клей-герметик марки «ВК-9»; 2 – эпоксидный клей-герметик марки «ЦМК-ТП»; 3 – кремнийорганический клей-герметик марки «СИЭЛ 159-406 М»

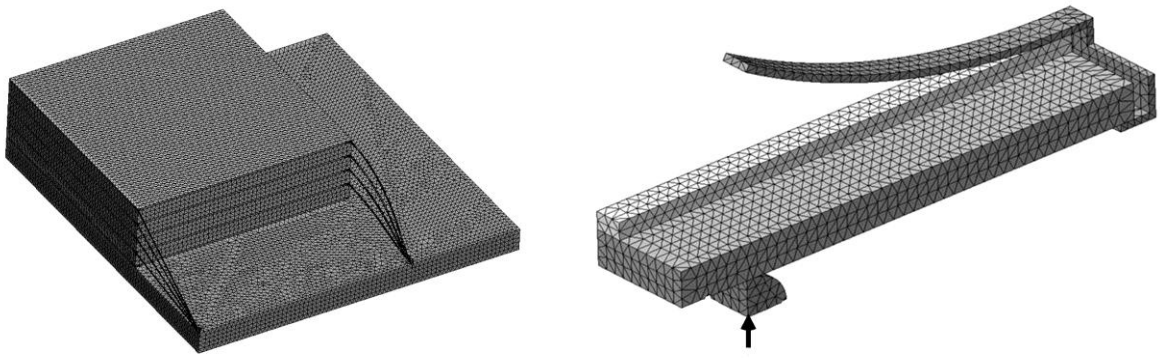
Fig. 6. Stress-strain diagrams σ along the length of adhesive joints *L* from the center to the edges of three-dimensional multichip microsystems for various types of adhesive materials (shown in the section of adhesive joints along the axis of symmetry *L*/2): 1 – polyamide-epoxy adhesive sealant adhesive «ВК-9»; 2 – epoxy adhesive sealant adhesive «ЦМК-ТП»; 3 – silicon adhesive sealant adhesive «СИЭЛ 159-406 М»

В результате исследований материалов, совместимых по модулям упругости и коэффициентам теплового линейного расширения, установлено, что адгезионные свойства исследуемых клеевых материалов превышают когезию внутри клеевых швов, однако в них отмечается неравномерность распределения напряжений с концентрацией по краям соединений (рис. 6). Для снижения неравномерности напряжений в соединениях МКМ целесообразно использовать низкомодульные эластичные клеи-герметики, например кремний-органический клей-герметик марки «СИЭЛ 159-406 М» с толщиной соединительных швов 50–150 мкм. Для обеспечения тепловых режимов модулей наиболее эффективны такие приемы по снижению влияния слоев с низкой теплопроводностью, как уменьшение их толщины, формирование теплопроводящих окон и применение термовставок. Так, наличие окон на боковых выступах в центре монтажных участков и на центральных частях гибких плат, заполненных клеем-герметиком при трехмерной сборке МКМ, с совместным применением термовставок позволяет снизить тепловое сопротивление стока тепла от кристаллов в 5,3 раза (до 1,4 К/Вт).

Для обеспечения надежности межкристальных коммутационных соединений МКМ исследовали устойчивость проводников к механическим воздействиям при сборке, монтаже и эксплуатации трехмерных конструкций. Для этого были разработаны аппроксимированные конечно-элементные модели и проведено моделирование отдельных узлов и элементов МКМ (рис. 7). Достоверность моделей и критериев устойчивости конструкционных элементов МКМ проверяли в результате испытаний материалов и соединений, что позволило учесть силы межфазного взаимодействия и механическую прочность сопряжений. Проволоку и тонколистовые материалы испытывали на растяжение, для чего использовали образцы, выполненные из двух материалов, соединенных внахлест припоем, механические свойства которых определяли сопоставлением растяжения соединенных и отдельных образцов. Гибкие платы испытывали на устойчивость к повторно-переменным нагрузкам путем многократных перегибов с заданными радиусами.

По результатам исследований и испытаний межкристальных коммутационных соединений установлена выносливость проводников МКМ при механических воздействиях, а также коэффициенты для расчетного определения по критерию Коффина – Мэнсона устойчивости проводников к механическим воздействиям на основе значений пластической деформации проводников в цикле нагружения:

$$N = 9,7 \cdot 10^{-4} (\varepsilon_{pl})^{-2,185},$$



а *б*

Рис. 7. Конечно-элементные модели межкристальных коммутационных соединений (а) и типового элемента гибких коммутационных плат (б) трехмерных МКМ
Fig. 7. Finite-element models of chip interconnections (*a*) and typical element of flexible switching boards (*b*) of the three-dimensional multichip microsystems

где N – число циклов нагружения; ε_{pl} – пластическая деформация в цикле нагружения при повторно-переменных воздействиях.

Расчеты показали, что использование защитного амортизирующего покрытия АД-9103 толщиной, равной толщине полиимидного пленочного материала гибких плат, позволяет увеличить в семь раз долговечность коммутационных соединений при действии циклических переменных изгибных напряжений. Это обусловлено увеличением толщины структуры соединений и, соответственно, смещением проводников ближе к нейтральному слою.

Заключение. Проведенные исследования показали, что реализация трехмерных МКМ обеспечивает создание современной ЭКБ с высокой степенью интеграции. В результате комплексного инженерного расчета изделий с проведением моделирования на основе метода конечных элементов установлено, что обеспечение надежности создаваемой ЭКБ на основе трехмерной интеграции, направленное на уменьшение числа отказов и повреждений, повышение устойчивости к механическим, температурным и другим воздействиям, достигается при соблюдении комплекса выработанных научно-технических рекомендаций и рациональном подборе материалов. По итогам исследований разработаны такие конструкции МКМ, как модульная трехмерная интеграция бескорпусной ЭКБ на основе кремниевых интерпозеров и гибких коммутационных плат.

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

Литература

1. ***Krishnamoorthy R., Krishnan K.*** Security empowered system-on-chip selection for Internet of Things // Intell. Autom. Soft Comput. 2021. Vol. 30. No. 2. P. 403–418. https://doi.org/10.32604/iasc.2021.018560

2. ***Flynn M. J., Wayne L.*** Computer system design: System-on-chip. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. IV, 356 p.

3. Разработка однокристального передающего модуля со встроенным синтезатором частот / ***А. Калёнов, Л. Недашковский, М. Дроздецкий и др.*** // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 8 (219). С. 76–81. https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.219.8.76.81. – EDN: PPABSX.

4. ***Hwang L.-T., Horng T.-S.*** 3D IC and RF SiPs: Advanced stacking and planar solutions for 5G mobility. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2018. 464 p.

5. ***Чугунов Е. Ю., Тимошенков С. П., Погалов А. И., Вертянов Д. В.*** Конструирование и расчеты трехмерных микроэлектронных модулей с высокой степенью интеграции компонентов // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2020. № 2 (178). С. 42–48. https://doi.org/10.7868/S2410993220020062. – EDN: OWMRXJ.

6. ***Кондрашин А. А., Лямин А. Н., Слепцов В. В.*** Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств: учеб. пособие. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2019. 210 с.

7. ***Грушевский А. М.*** Сборка и монтаж многокристальных микромодулей: учеб. пособие / под ред. Л. А. Коледова. М.: МИЭТ, 2003. 195 с.

8. Пат. 2657092 РФ. Способ изготовления трехмерного многокристального модуля на гибкой плате / ***Г. А. Блинов, А. И. Погалов, Е. Ю. Чугунов***; заявл. 25.05.2017; опубл. 08.06.2018, Бюл. № 16. 9 с. EDN: MGLLWY.

9. ***Muzel S. D., Bonhin E. P., Guimarães N. M., Guidi E. S.*** Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review // Polymers. 2020. Vol. 12. Iss. 4. Art. No. 818. https://doi.org/10.3390/polym12040818

10. ***Чугунов Е. Ю., Погалов А. И., Тимошенков С. П.*** Инженерные расчеты узлов и сборок изделий микроэлектронной техники с применением конечно-элементного моделирования // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 255–264. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-255-264. – EDN: SHNYLJ.

11. ***Анурьев В. И.*** Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / под ред. И. И. Жестковой. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3. 927 с.

12. ***Феодосьев В. И.*** Сопротивление материалов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 592 с. (Механика в техническом университете: в 8 т. / отв. ред. К. С. Колесников; т. 2).

Статья поступила в редакцию 13.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 26.09.2023 г.; принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Чугунов Евгений Юрьевич – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), chugunov-eu@inbox.ru

Тимошенков 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), spt@miee.ru

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

References

1. Krishnamoorthy R., Krishnan K. Security empowered system-on-chip selection for Internet of Things. *Intell. Autom. Soft Comput.*, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 403–418. https://doi.org/10.32604/iasc.2021.018560

2. Flynn M. J., Wayne L. *Computer system design: System-on-chip.* Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2011. iv, 356 p.

3. Kalyonov A., Nedashkovsky L., Drozdetsky M., Losev V., Chaplygin Yu. Development of a single-chip transmitting module with a built-in frequency synthesizer. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2022, no. 8 (219), pp. 76–81. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.219.8.76.81. – EDN: PPABSX.

4. Hwang L.-T., Horng T.-S. *3D IC and RF SiPs: Advanced stacking and planar solutions for 5G mobility.* Hoboken, NJ, Wiley-IEEE Press, 2018. 464 p.

5. Chugunov E. Yu., Timoshenkov S. P., Pogalov A. I., Vertyanov D. V. Design and calculation of three-dimensional microelectronic modules with a high degree of component integration. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3. Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*, 2020, no. 2 (178), pp. 42–48. (In Russian). https://doi.org/10.7868/S2410993220020062. – EDN: OWMRXJ.

6. Kondrashin A. A., Lyamin A. N., Sleptsov V. V. *Modern technologies for manufacturing three-dimensional electronic devices*, study guide. 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2019. 210 p. (In Russian).

7. Grushevskiy A. M. *Assembly and mounting of multichip micromodules,* study guide, ed. L. A. Koledov. Moscow, MIET, 2003. 195 p. (In Russian).

8. Blinov G. A., Pogalov A. I., Chugunov E. Yu. *Method of the three-dimensional multi-crystal module on flexible board manufacturing.* Patent 2657092 RF, publ. 08.06.2018, Bul. no. 16. 9 p. (In Russian). EDN: MGLLWY.

9. Muzel S. D., Bonhin E. P., Guimarães N. M., Guidi E. S. Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers,* 2020, vol. 12, iss. 4, art. no. 818. https://doi.org/10.3390/polym12040818

10. Chugunov E. Yu., Pogalov A. I., Timoshenkov S. P. Engineering calculations of microelectronic products parts and assemblies using finite-element modeling. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics,* 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 255–264. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-255-264. – EDN: SHNYLJ.

11. Anur'yev V. I., Zhestkova I. I. (ed.). *Handbook of a mechanical engineering constructor,* in 3 vol. Vol. 3. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006. 927 p. (In Russian).

12. Feodos'yev V. I. *Strength of materials,* study guide for universities. Moscow, Bauman State Technical Univ. Publ., 2000. 592 p. (In Russian). Mechanics in technical university Series, in 8 vol., publ. ed. K. S. Kolesnikov, vol. 2.

The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 26.09.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Evgeny Yu. Chugunov – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), chugunov-eu@inbox.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), spt@miee.ru

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

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

Полные тексты статей журнала с 2004 по 2023 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
BIOMEDICAL ELECTRONICS

Научная статья
УДК 621.3.051.025
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-108-117
EDN: VPZCMA

Влияние паразитных компонентов и нагрева конденсаторов на адаптивную подстройку усилителя мощности в системе индуктивного питания медицинских имплантатов

Е. В. Селютина, К. О. Гуров, Э. А. Миндубаев, А. А. Данилов

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

opplyana@gmail.com

Аннотация. Адаптивный усилитель мощности класса Е поддерживает постоянный уровень выходной мощности систем индуктивного питания медицинских имплантатов независимо от смещений передающей и принимающей катушек индуктивности. При проектировании данного усилителя одним из ключевых вопросов является исследование влияния нагрева и паразитных компонентов конденсаторов в нагрузочной цепи на адаптивную подстройку. В работе рассмотрены два способа реализации переменной шунтирующей емкости и переменной последовательной емкости в нагрузочной цепи усилителя мощности класса Е. В первом случае на месте каждой емкости использован массив конденсаторов NP0. Во втором случае обе переменные емкости реализованы в виде массивов конденсаторов X7R. В результате численного моделирования и эксперимента показано, что нагрев конденсаторов X7R в нагрузочной цепи адаптивного усилителя мощности класса Е ведет к уменьшению выходной мощности систем индуктивного питания. При использовании в рассматриваемом усилителе мощности конденсаторов NP0 уменьшение общей эффективности и выходной мощности систем индуктивного питания происходит в результате влияния паразитных компонентов этих конденсаторов, а нагрев этих конденсаторов на выходные характеристики систем индуктивного питания не влияет.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, индуктивная связь, усилитель мощности класса Е, имплантируемые медицинские приборы, конденсаторы, паразитные компоненты

Финансирование работы: работа выполнена в рамках госзадания (Соглашение № 075-03-2023-024).

© Е. В. Селютина, К. О. Гуров, Э. А. Миндубаев, А. А. Данилов, 2024

Для цитирования: Селютина Е. В., Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Влияние паразитных компонентов и нагрева конденсаторов на адаптивную подстройку усилителя мощности в системе индуктивного питания медицинских имплантатов // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 108–117. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-108-117. – EDN: VPZCMA.

Original article

Parasitic components and capacitors heating impact on power amplifier adaptive tuning in the inductive supply system for medical implants

E. V. Selyutina, K. O. Gurov, E. A. Mindubaev, A. A. Danilov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

opplyana@gmail.com

Abstract. The adaptive class E power amplifier maintains the constant output power level of inductive supply systems for medical implants irrespective of the displacements of transmitting and receiving inductive coils. One of key issues while designing this amplifier is the investigation of impact of capacitors heating and parasitic components in the load network on adaptive tuning. In this work, two cases of realization of variable shunt and variable series capacitance in the load network of class E power amplifier are considered. In the first case, in the place of each capacitance an array of NP0 capacitors was used. In the second case, both variable capacitances were realized as arrays of X7R capacitors. The results of numerical simulation and experiment have shown that heating of X7R capacitors in the power amplifier load network leads to output power decrease in the inductive supply system. At the same time, when NP0 capacitors are used in the power amplifier under consideration the decrease of output power and overall efficiency of inductive supply systems is due to parasitic components of these capacitors, whereas the heating of these capacitors has no impact on output characteristics of inductive supply systems.

Keywords: wireless power transfer, inductive coupling, class E power amplifier, implantable medical devices, capacitors, parasitic components

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment (Agreement no. 075-03-2023-024).

For citation: Selyutina E. V., Gurov K. O., Mindubaev E. A., Danilov A. A. Parasitic components and heating of capacitors impact on power amplifier adaptive tuning in the inductive supply system for medical implants. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 108–117. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-108-117. – EDN: VPZCMA.

Введение. Системы индуктивного питания (ИП) используются для энергообеспечения, например, электромобилей [1] и железнодорожного транспорта [2], дронов [3], смартфонов [4], имплантируемых медицинских приборов [5]. В передатчике систем ИП широко применяется усилитель мощности (УМ) класса Е [6–8], обеспечивающий высокую эффективность системам ИП при работе на различных частотах.

Для повышения устойчивости к смещениям катушек индуктивности в работах [9–10] предложена схема адаптивного УМ класса Е, в нагрузочной цепи которого проводится динамическая подстройка шунтирующей и последовательной емкостей для поддержания постоянного уровня выходной мощности в системе ИП. При технической реализации адаптивной подстройки в предложенном УМ одним из ключевых вопросов является влияние нагрева и паразитных компонентов конденсаторов на выходные характеристики систем ИП.

В настоящей работе проводятся численное моделирование и экспериментальная верификация систем ИП медицинских имплантатов с адаптивным УМ класса Е. Переменные емкости в нагрузочной цепи УМ реализуются с помощью массивов конденсаторов. Рассматриваются случаи, когда в массивах используются конденсаторы NP0 и X7R.

Описание системы индуктивного питания с адаптивным усилителем класса Е. Схема предлагаемой системы ИП с адаптивным УМ класса Е представлена на рис. 1. Особенность данной системы – использование в передатчике адаптивного УМ класса Е, состоящего из транзисторного ключа S и нагрузочной цепи. В нагрузочную цепь входят передающая катушка L_T, а также шунтирующая C_P и последовательная C_S переменные емкости.

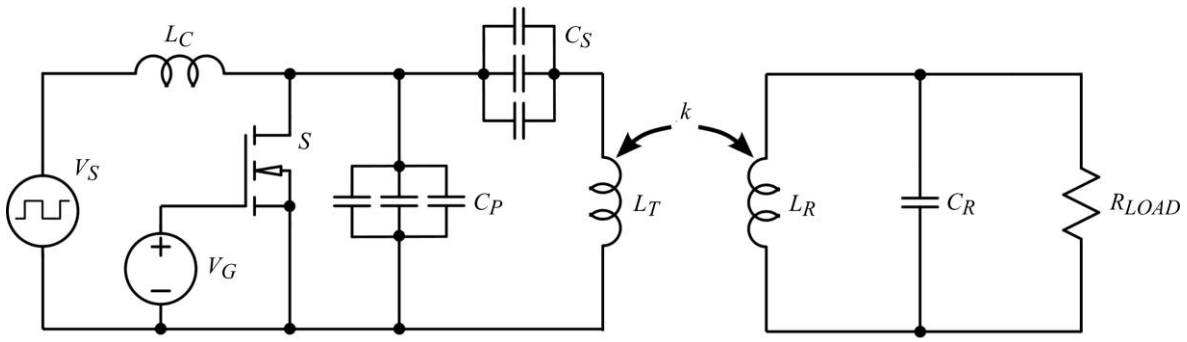


Рис. 1. Принципиальная схема системы ИП с адаптивным УМ класса Е: V_G – импульсный генератор; V_S – источник постоянного питания; L_C – дроссель; S – транзисторный ключ; C_S и C_P – соответственно последовательный и шунтирующий массив конденсаторов; L_T и L_R – соответственно передающая и принимающая катушки индуктивности; k – коэффициент связи L_T и L_R; R_{LOAD} – нагрузка; C_R – компенсирующий конденсатор

Fig. 1. Principal diagram of the IS system with an adaptive class E PA: V_G – pulse generator; V_S – DC power supply; L_C – choke; S – transistor switch; C_S and C_P – series and shunt massive of capacitors respectively; L_T and L_R – transmitting and receiving inductive coils respectively; k – couple coefficient of L_T and L_R; R_{LOAD} – load; C_R – compensating capacitor

Переменные емкости C_P и C_S могут быть реализованы с помощью одного переменного конденсатора и массива переключаемых конденсаторов. Переменные конденсаторы имеют малый номинал (порядка нескольких сотен пикофарад [11]), вследствие чего могут возникнуть трудности с компенсацией влияния смещений катушек систем ИП. Таким образом, переменные емкости в нагрузочной цепи адаптивного УМ класса Е целесообразно реализовать с помощью массивов переключаемых конденсаторов. Приемник рассматриваемой системы ИП включает в себя принимающую катушку индуктивности L_R, нагрузку R_{LOAD}, а также компенсирующий конденсатор C_R. Все компоненты соединены друг с другом параллельно.

Для проектирования систем ИП с УМ класса Е применяются керамические конденсаторы классов 1 и 2. Преимущество таких конденсаторов заключается в обеспечении большого номинала при сравнительно малых размерах. Керамические конденсаторы

класса 1 поддерживают требуемую емкость независимо от нагрева, однако максимальная емкость таких конденсаторов не превышает нескольких десятков нанофарад. Керамические конденсаторы класса 2 менее устойчивы к нагреву, чем конденсаторы класса 1, однако максимальная емкость таких конденсаторов достигает нескольких сотен нанофарад. Распространенными керамическими конденсаторами классов 1 и 2 являются конденсаторы с диэлектриками NP0 и X7R соответственно.

Численное моделирование и экспериментальная верификация систем индуктивного питания с адаптивным усилителем. Влияние нагрева и паразитных компонентов конденсаторов на адаптивную подстройку в УМ класса Е исследовали в последовательности, приведенной ниже.

1. Численное моделирование систем ИП с адаптивным УМ класса Е. Емкости реальных моделей конденсаторов в нагрузочной цепи УМ соответствуют значениям при комнатной температуре.

2. Экспериментальная верификация результатов численного моделирования, полученных в п. 1. Расчет емкостей конденсаторов в нагрузочной цепи УМ класса Е с учетом нагрева этих конденсаторов.

3. Численное моделирование систем ИП с адаптивным УМ класса Е. В нагрузочной цепи УМ класса Е емкости конденсаторов изменены с учетом результатов, полученных в п. 2.

Численное моделирование. Для численного моделирования систем ИП с адаптивным УМ класса Е применяли программу LTSpice с большой стандартной библиотекой моделей реальных электронных компонентов. В ходе моделирования использовали следующие электрические параметры рассматриваемых систем ИП с адаптивным УМ класса Е:

Входное напряжение генератора V_G ..... 5 В
Рабочая частота f .....880 кГц
Коэффициент заполнения импульсов D .....50 %
Время спада / нарастания сигнала V_G ..... 11,36 нс
Напряжение источника постоянного питания V_S ..... 5 В
Внутреннее сопротивление источника питания V_S ..... 2,5 Ом
Индуктивность дросселя L_C ..... 1000 мкГн
Индуктивность катушки L_T или L_R ..... 1,92 мкГн
Сопротивление катушки L_T или L_R ..... 0,14 Ом
Сопротивление нагрузки R_{LOAD} ..... 22 Ом
Емкость компенсирующего конденсатора C_R .....10,7 нФ

Осевое расстояние между передающей и принимающей катушками индуктивности составляет 5, 10, 15 или 20 мм. Выбранные значения соответствуют стандартной глубине имплантации приемника системы ИП с имплантируемыми медицинскими приборами. Поскольку в LTSpice нельзя в явном виде установить расстояние между электронными компонентами, рассчитывали коэффициенты связи, соответствующие рассматриваемым осевым расстояниям между катушками индуктивности.

Моделирование систем ИП с адаптивным УМ класса Е проводили для следующих случаев:

– численное моделирование систем ИП, когда в нагрузочной цепи адаптивного УМ класса Е каждая переменная емкость реализована в виде одного идеального переменного конденсатора. В процессе моделирования подбираются такие номиналы шунтирующего и последовательного конденсаторов, при которых обеспечивается условие переключения при нулевом напряжении в УМ, а также поддерживается выходная мощность порядка 1,1 Вт на заданном осевом расстоянии между катушками системы ИП. Этот случай моделирования является опорным;

– численное моделирование систем ИП, когда в нагрузочной цепи адаптивного УМ класса Е используются два массива параллельно соединенных конденсаторов NP0. Общая емкость каждого массива равна рассчитанной емкости шунтирующего или последовательного конденсатора;

– численное моделирование систем ИП, когда в нагрузочной цепи адаптивного УМ класса Е используются конденсаторы X7R. Каждый из двух массивов параллельно соединенных конденсаторов X7R имеет емкость, равную емкости шунтирующего или последовательного идеального конденсатора на заданном осевом расстоянии между катушками системы ИП.

В результате численного моделирования рассматриваемых систем ИП с адаптивным УМ класса Е для первых двух случаев рассчитаны следующие выходные характеристики:

– выходная мощность P_{LOAD}:

$$P_{LOAD} = U_{LOAD} I_{LOAD}, \tag{1}$$

где U_{LOAD} и I_{LOAD} – соответственно напряжение и ток на нагрузке R_{LOAD};

– общая эффективность η системы ИП:

$$\eta = \frac{P_{LOAD}}{P_{V_S}} \cdot 100\%, \tag{2}$$

$$P_{V_S} = U_{V_S} I_{V_S}, \tag{3}$$

где P_{V_S} – входная мощность; I_{V_S}, U_{V_S} – ток и напряжение на источнике постоянного питания V_S соответственно.

Экспериментальная верификация. Проведена экспериментальная верификация работы систем ИП с адаптивным УМ класса Е. На рис. 2 показана печатная плата передатчика системы ИП с адаптивным УМ класса Е.

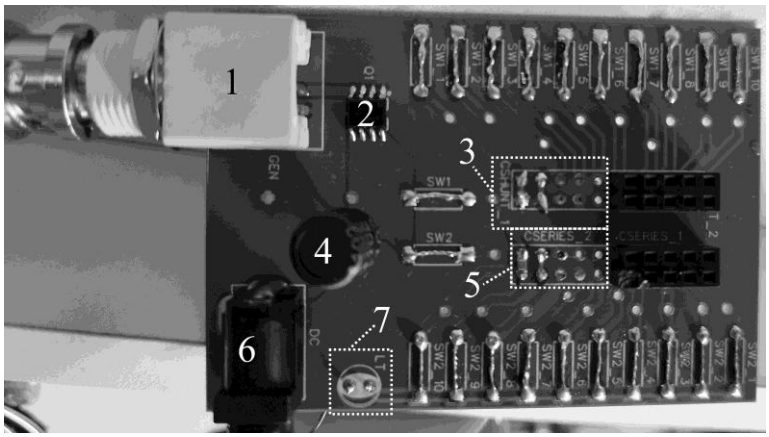


Рис. 2. Передатчик экспериментальной системы ИП с адаптивным УМ класса Е: 1 – разъем для подключения к импульсному генератору V_G; 2 – транзисторный ключ S; 3 – массив C_P конденсаторов вместо одного стандартного шунтирующего конденсатора; 4 – дроссель L_C; 5 – массив C_S конденсаторов вместо одного стандартного последовательного конденсатора; 6 – разъем для подключения к источнику постоянного питания V_S; 7 – место для крепления передающей катушки L_T

Fig. 2. Transmitter of the experimental IS system with an adaptive class E PA: 1 – connector to the pulse generator V_G; 2 – transistor switch S; 3 – massive C_P of capacitors instead of one standard shunt capacitor; 4 – choke L_C; 5 – massive C_S of capacitors instead of one standard series capacitor; 6 – connector to the DC power supply V_S; 7 – place to connect the transmitter coil L_T

В экспериментальных системах использовали следующие компоненты (номиналы этих компонентов соответствуют номиналам для численного моделирования в LTSpice):

Импульсный генератор V_G ..... Tektronix AFG 3252
Источник постоянного питания V_S ..... MATRIX MPS-3010L-1
Дроссель L_C RLB0914-102KL
Транзисторный ключ S IRF8707
Передающая L_T или принимающая L_R
катушка индуктивности ..... Внешний радиус 20 мм
Число витков 7
Расстояние между центрами витков 1,5 мм
Радиус сечения медного провода 0,25 мм
Нагрузка R_{LOAD} ..... Параллельно соединенные углеродистые резисторы 30 и 82 Ом

В ходе экспериментальной верификации рассматривали два варианта систем ИП: в нагрузочной цепи адаптивного УМ класса Е использовали массивы конденсаторов NP0 и X7R. В результате проведения эксперимента с рассматриваемыми системами ИП рассчитывали следующие выходные характеристики:

– выходная мощность P_{LOAD}:

$$P_{LOAD} = \frac{U_{LOAD}^{2}}{R_{LOAD}}, \quad (4)$$

где U_{LOAD} – напряжение на нагрузке; R_{LOAD} – сопротивление нагрузки;

– общая эффективность (рассчитывается, как в случае численного моделирования систем ИП).

На рис. 3 представлена температура конденсаторов УМ класса Е в зависимости от изменения осевого расстояния между катушками индуктивности. Данные получены с помощью тепловизора Fluke TiS 50 спустя 15 с после начала работы систем ИП. Видно, что температура конденсаторов NP0 в ходе работы систем ИП относительно стабильна как при реализации переменной шунтирующей емкости, так и переменной последовательной емкости в нагрузочной цепи УМ. Температура конденсаторов X7R выше, чем температура конденсаторов NP0. Значительный нагрев отмечается при реализации переменной последовательной емкости в УМ класса Е.

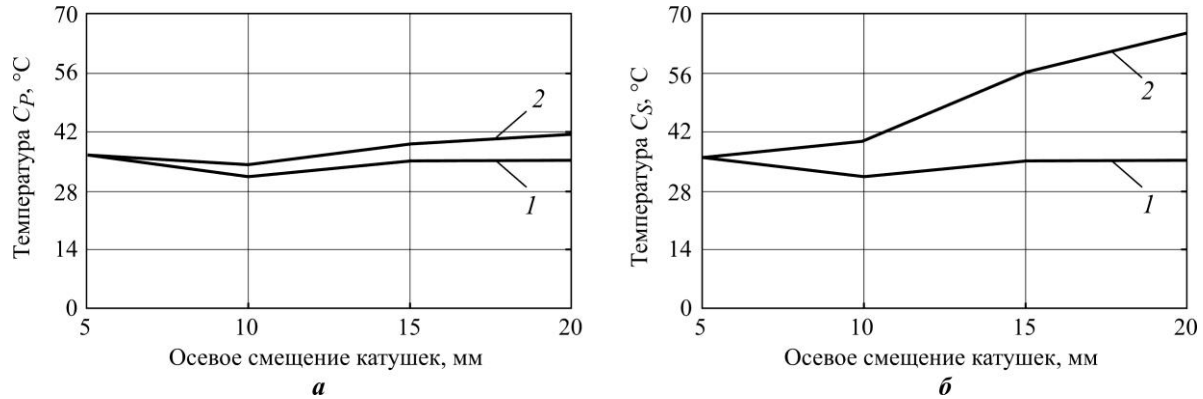


Рис. 3. Нагрев массива конденсаторов NP0 (кривая *1*) и X7R (кривая *2*): *а* – массив на месте шунтирующей емкости C_P; *б* – массив на месте последовательной емкости C_S в нагрузочной цепи адаптивного УМ класса Е

Fig. 3. Heating of the massive including NP0 capacitors (curve *1*) and X7R capacitors (curve *2*): *a* – to realize variable shunt capacitance C_P; *b* – to realize variable series capacitance C_S

Численное моделирование при изменившихся в результате нагрева емкостях конденсаторов. При использовании стандартных команд в программе LTSpice возможно рассмотреть работу электронной схемы при изменении температуры окружающей среды. Однако нагрев отдельно взятых электронных компонентов рассмотреть нельзя [12]. С учетом изменения емкости конденсаторов ввиду нагрева проводили численное моделирование систем ИП с адаптивным УМ класса Е. Электрические параметры, а также формулы для расчета выходной мощности и общей эффективности систем ИП соответствуют использованным в проведенном моделировании.

Емкость каждого конденсатора NP0 из массива рассчитывали с учетом значения 30 ppm/°C. Это максимально возможное уменьшение емкости при увеличении температуры на 1°C, которое указано в технической документации на конденсаторы данного типа. В этом случае при расчетах емкости важно знать разницу между первоначальной, комнатной, температурой и температурой, установившейся в результате нагрева конденсаторов в нагрузочной цепи УМ класса Е. Для расчета емкости конденсаторов X7R в результате нагрева использовали температурную зависимость, приведенную в технической документации на используемые конденсаторы. В данном случае важно знать только температуру, установившуюся в результате нагрева конденсаторов.

Результаты численного моделирования и экспериментальной верификации. Результаты расчета выходной мощности по формулам (1) и (4) представлены на рис. 4, *а*. Данные получены как в результате численного моделирования, так и в результате экспериментальной верификации систем ИП с адаптивным УМ класса Е. Первоначальный уровень выходной мощности, рассчитанный после численного моделирования при комнатной температуре, составил 0,73–1,13 Вт при использовании конденсаторов X7R в УМ класса Е. При нагреве этих конденсаторов уменьшается их емкость, что ведет к уменьшению выходной мощности систем ИП до 27 % от первоначального уровня. Дальнейшее уменьшение мощности связано с дополнительным влиянием паразитных

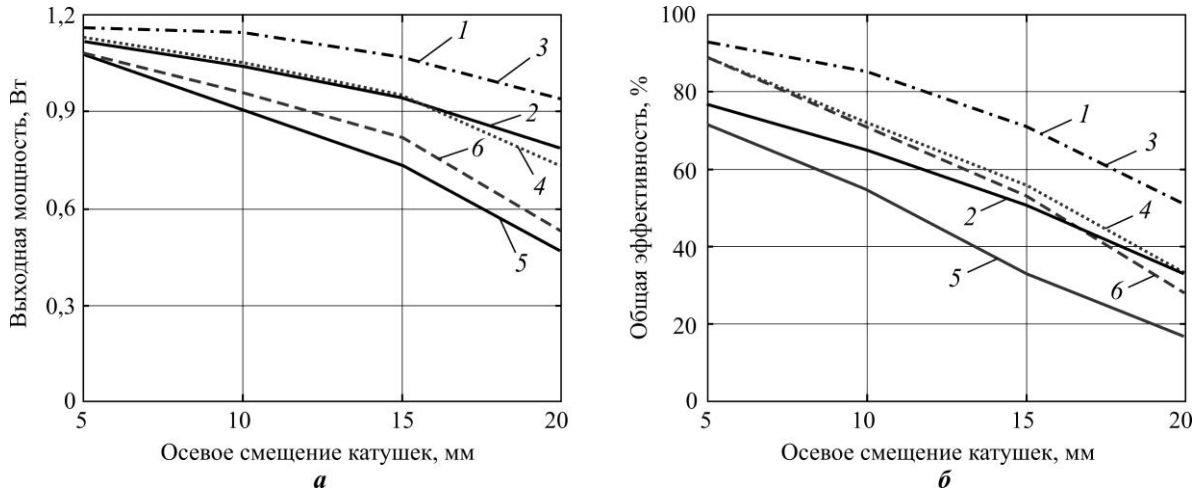


Рис. 4. Выходная мощность (*а*) и общая эффективность (*б*) систем ИП с адаптивным УМ класса Е: *1* – конденсаторы NP0 (моделирование при комнатной температуре); *2* – конденсаторы NP0 (эксперимент); *3* – конденсаторы NP0 (моделирование после нагрева конденсаторов); *4* – конденсаторы X7R (моделирование при комнатной температуре); *5* – конденсаторы X7R (эксперимент); *6* – конденсаторы X7R (моделирование после нагрева конденсаторов)

Fig. 4. Output power (*a*) and overall efficiency (*b*) of IS systems with an adaptive class E PA: *1* – NP0 capacitors (simulation at room temperature); *2* – NP0 capacitors (experiment); *3* – NP0 capacitors (simulation after heating of capacitors); *4* – X7R capacitors (simulation at room temperature); *5* – X7R capacitors (experiment); *6* – X7R capacitors (simulation after heating of capacitors)

компонентов конденсаторов X7R. При использовании в УМ класса E конденсаторов NP0 первоначальная выходная мощность составляет 0,94–1,16 Вт. Она не изменяется при нагреве, однако может уменьшиться до 16 % при влиянии паразитных компонентов конденсаторов.

Общая эффективность систем ИП также рассчитана в результате численного моделирования и экспериментальной верификации по формулам (1)–(4). Результаты показаны на рис. 4, *б*. Первоначальная эффективность составила 51–93 % при использовании конденсаторов NP0 и 34–89 % – конденсаторов X7R в нагрузочной цепи УМ класса E. Уменьшение эффективности преимущественно связано с влиянием паразитных компонентов конденсаторов: при использовании конденсаторов NP0 и X7R эффективность может уменьшиться на 20 и 23 % соответственно. Нагрев оказывает влияние только при использовании в УМ класса E конденсаторов X7R на больших осевых расстояниях между катушками систем ИП. В этом случае эффективность уменьшается до 6 %.

Заключение. В результате проведенного исследования установлено, что нагрев и паразитные компоненты конденсаторов в нагрузочной цепи УМ класса E для систем индуктивного питания медицинских имплантатов влияют на адаптивную подстройку. Степень влияния того или иного фактора зависит от класса используемых конденсаторов. При использовании в УМ класса E массивов конденсаторов X7R (класс 2) на адаптивную подстройку оказывают влияние и нагрев, и паразитные компоненты конденсаторов. Нагрев ведет к значительному уменьшению уровня выходной мощности систем ИП, а паразитные компоненты влияют на общую эффективность этих систем. При использовании в УМ класса E массивов конденсаторов NP0 (класс 1) возможно устранение влияния нагрева этих конденсаторов на адаптивную подстройку. При этом на подстройку существенное влияние могут оказывать паразитные компоненты: в системах ИП с рассматриваемыми конденсаторами отмечается уменьшение выходной мощности и общей эффективности. Следовательно, нагрев конденсаторов может быть только одной из причин ухудшения адаптивной подстройки в УМ класса E.

Дальнейшее исследование систем ИП с адаптивной подстройкой УМ класса E возможно в двух направлениях. Первое направление исследования заключается в улучшении адаптивной подстройки за счет увеличения выходных характеристик систем ИП с УМ класса E. Для этого следует отдельно рассмотреть влияние других параметров конденсаторов NP0. Примерами таких параметров могут быть рабочее напряжение и типоразмер конденсаторов. Второе направление исследования заключается в выявлении условий, при которых возможно упрощение технической реализации адаптивной подстройки за счет уменьшения размеров массивов конденсаторов, времени проектирования, стоимости используемых электронных компонентов. Так, в ходе работы отмечена незначительная разница между выходными характеристиками систем ИП при малых осевых расстояниях между катушками индуктивности. Поскольку малые расстояния могут соответствовать высокому коэффициенту связи катушек, одним из вариантов является увеличение собственной индуктивности передающей и принимающей катушек. Также нагрев конденсаторов X7R сильнее при реализации переменной последовательной емкости, чем при реализации переменной шунтирующей емкости в нагрузочной цепи УМ класса E. Соответственно, при реализации шунтирующей емкости выбором конденсаторов возможно пренебречь.

Литература

1. ***Nama J. K., Srivastava M., Verma A. K.*** Modified inductive power transfer topology for electrical vehicle battery charging using auxiliary network to achieve zero-voltage switching for full load variations // IET Power Electronics. 2019. Vol. 12. Iss. 10. P. 2513–2522. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.6345

2. ***Wang H., Li X.*** Review and research progress of wireless power transfer for railway transportation // IEEJ Trans. Elec. Electron. Eng. 2019. Vol. 14. Iss. 3. P. 475–484. https://doi.org/10.1002/tee.22829

3. Dynamic capabilities of multi-MHz inductive power transfer systems demonstrated with batteryless drones / ***J. M. Arteaga, S. Aldhaher, G. Kkelis et al.*** // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 34. No. 6. P. 5093–5104. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2871188

4. ***Feng J., Li Q., Lee F. C.*** Coil and circuit design of omnidirectional wireless power transfer system for portable device application // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR: IEEE, 2018. P. 914–920. https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557465

5. ***Khan S. R., Pavuluri S. K., Cummins G., Desmulliez M. P. Y.*** Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review // Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 12. Art. No. 3487. https://doi.org/10.3390/s20123487

6. ***Sokal N. O., Sokal A. D.*** Class E – A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1975. Vol. 10. No. 3. P. 168–176. https://doi.org/10.1109/JSSC.1975.1050582

7. ***Liu H., Shao Q., Fang X.*** Modeling and optimization of class-E amplifier at subnominal condition in a wireless power transfer system for biomedical implants // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 35–43. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2016.2538320

8. ***Popovic Z., Garcia J. A.*** Microwave class-E power amplifiers: A brief review of essential concepts in high-frequency class-E PAs and related circuits // IEEE Microwave Magazine. 2018. Vol. 19. No. 5. P. 54–66. https://doi.org/10.1109/MMM.2018.2822202

9. ***Mindubaev E. A., Selyutina E. V., Danilov A. A.*** Tuning of class E power amplifier for compensating the effect of the receiver coil implantation depth on the operation of a wireless transcutaneous energy transfer system // Biomed. Eng. 2020. Vol. 54. Iss. 4. P. 258–261. https://doi.org/10.1007/s10527-020-10017-3

10. ***Selyutina E. V., Mindubaev E. A.*** Effects of class E power amplifier parameters on output power of inductive wireless power transfer system with capacitive tuning // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2021. P. 2874–2878. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396653

11. ***Dummer G. W. A., Nordenberg H. M.*** Fixed and variable capacitors. New York: McGraw-Hill, 1960. XIV, 288 p.

12. ***Engelhardt M.*** LTspice XVII help file / Analog Devices Corp. // agnd.net: Your Electronic Reference [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://agnd.net/valpo/341/LTspiceHelpXVII.pdf (дата обращения: 22.11.2023).

Статья поступила в редакцию 25.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 06.09.2023 г.; принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Селютина Елена Викторовна – аспирант, инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), opplyana@gmail.com

Гуров Константин Олегович – аспирант, инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), constantinegurov@yandex.ru

Миндубаев Эдуард Адипович – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), edmindubaev@gmail.com

Данилов Арсений Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории беспроводных биомедицинских интерфейсов Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), arseny.danilov@gmail.com

References

1. Nama J. K., Srivastava M., Verma A. K. Modified inductive power transfer topology for electrical vehicle battery charging using auxiliary network to achieve zero-voltage switching for full load variations. *IET Power Electronics*, 2019, vol. 12, iss. 10, pp. 2513–2522. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.6345

2. Wang H., Li X. Review and research progress of wireless power transfer for railway transportation. *IEEJ Trans. Elec. Electron. Eng.*, 2019, vol. 14, iss. 3, pp. 475–484. https://doi.org/10.1002/tee.22829

3. Arteaga J. M., Aldhaher S., Kkelis G., Kwan C., Yates D. C., Mitcheson P. D. Dynamic capabilities of multi-MHz inductive power transfer systems demonstrated with batteryless drones. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 34, no. 6, pp. 5093–5104. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2871188

4. Feng J., Li Q., Lee F. C. Coil and circuit design of omnidirectional wireless power transfer system for portable device application. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).* Portland, OR, IEEE, 2018, pp. 914–920. https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557465

5. Khan S. R., Pavuluri S. K., Cummins G., Desmulliez M. P. Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 12, art. no. 3487. https://doi.org/10.3390/s20123487

6. Sokal N. O., Sokal A. D. Class E – A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1975, vol. 10, no. 3, pp. 168–176. https://doi.org/10.1109/JSSC.1975.1050582

7. Liu H., Shao Q., Fang X. Modeling and optimization of class-E amplifier at subnominal condition in a wireless power transfer system for biomedical implants. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 35–43. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2016.2538320

8. Popovic Z., Garcia J. A. Microwave class-E power amplifiers: A brief review of essential concepts in high-frequency class-E PAs and related circuits. *IEEE Microwave Magazine*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 54–66. https://doi.org/10.1109/MMM.2018.2822202

9. Mindubaev E. A., Selyutina E. V., Danilov A. A. Tuning of class E power amplifier for compensating the effect of the receiver coil implantation depth on the operation of a wireless transcutaneous energy transfer system. *Biomed. Eng.*, 2020, vol. 54, iss. 4, pp. 258–261. https://doi.org/10.1007/s10527-020-10017-3

10. Selyutina E. V., Mindubaev E. A. Effects of class E power amplifier parameters on output power of inductive wireless power transfer system with capacitive tuning. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).* St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2021, pp. 2874–2878. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396653

11. Dummer G. W. A., Nordenberg H. M. *Fixed and variable capacitors.* New York, McGraw-Hill, 1960. xiv, 288 p.

12. Engelhardt M., Analog Devices Corp. LTspice XVII help file. *agnd.net: Your Electronic Reference.* 2018. Available at: https://agnd.net/valpo/341/LTspiceHelpXVII.pdf (accessed: 22.11.2023).

The article was submitted 25.05.2023; approved after reviewing 06.09.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Elena V. Selyutina – PhD student, Engineer of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), opplyana@gmail.com

Konstantin O. Gurov – PhD student, Engineer of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), constantinegurov@yandex.ru

Eduard A. Mindubaev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Engineer of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), edmindubaev@gmail.com

Arseny A. Danilov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Head of the Research Laboratory of Wireless Biomedical Interfaces, Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), arseny.danilov@gmail.com

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 007.51:303.732
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-1-118-129
EDN: UJNZBJ

Синтез метода оценки эффективности системы информационной безопасности

А. В. Лубенцов

Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

lubensov@mail.ru

Аннотация. Структурный состав современных систем информационной безопасности характеризуется сложностью и многоэлементностью. Отклонение от установленных норм, снижение эффективности функционирования любого элемента приводят к нарушению штатного работоспособного состояния всей системы. В работе оценка эффективности функционирования систем информационной безопасности рассмотрена как задача синтеза многомерных решений с использованием многопараметрических данных. На примере систем информационной безопасности проанализирован подход системного анализа работы сложных систем, основанный на декомпозиции функциональной структуры и разбиении базовых подсистем на элементарные блоки. Предложен метод, основанный на построении базовых правил с использованием интервальных параметров. Предложены синтез и использование нелинейной модели для оценки эффективности сложной информационной системы. Для цифровизации неопределенностей, ошибок в исходных данных, неточностей измерений и двойственности в экспертных оценках использована интервальная форма, заменяющая элементы данных. Для исследования функционирования подсистем, уровня их влияния и вклада в эффективность всей системы проведен системный анализ точности оценки каждого рассматриваемого элемента. Показано, что на базе полученных оценок и анализа появляется возможность разработки руководящих документов и стратегий развития всей информационной системы и эволюции ее подсистем. Предложен каскадный метод анализа иерархий, в несколько раз снижающий субъективное влияние экспертов и лиц, принимающих решение, в ранжировании используемых критериев, что повышает качество оценки эффективности как отдельных подсистем, так и системы защиты информации в целом.

© А. В. Лубенцов, 2024

Ключевые слова: синтез, декомпозиция, система информационной безопасности, интервальные оценки, эффективность, оценка эффективности, каскадный метод анализа иерархий

Для цитирования: Лубенцов А. В. Синтез метода оценки эффективности системы информационной безопасности // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 118–129. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-118-129. – EDN: UJNZBJ.

Original article

Synthesis of a method for evaluating the effectiveness of an information security system

A. V. Lubentsov

Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russia

lubensov@mail.ru

Abstract. The structural composition of modern information security systems is characterized by complexity and multiplicity. Deviation from the established norms, decrease in the efficiency of any element lead to a violation of the nominal operational state of the entire system. In this work, the evaluation of the effectiveness of information security system is considered as a task of synthesis of multidimensional solutions using multiple data. Through the example of information security systems the approach of system analysis of complex systems operation is considered, based on the functional structure decomposition and the basic subsystems division into elementary blocks. A method based on the basic rules building using interval parameters is proposed. The synthesis and nonlinear model use for evaluating the effectiveness of a complex information system are proposed. For digitizing of uncertainties, initial errors, measurement inaccuracies and duality in expert estimates, the interval form that replaces data elements is used. For the study of subsystems functioning, effect level and contribution to the entire system efficiency, system analysis of accuracy of each considered element evaluation was conducted. It has been demonstrated that based on obtained estimations and analysis it becomes possible to create guidance documents and development strategies for the entire information system and the evolution of its subsystems. The cascade method of hierarchy analysis is proposed, reducing by several times the subjective influence of experts and decision makers in employed criteria ranking, which improves quality of effectiveness evaluation for both individual subsystems and the information security system as a whole.

Keywords: synthesis, decomposition, information security system, interval estimates, efficiency, effectiveness evaluation, cascade method of hierarchy analysis

For citation: Lubentsov A. V. Synthesis of a method for evaluating the effectiveness of an information security system. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 118–129. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-118-129. – EDN: UJNZBJ.

Введение. С непрерывным расширением функционала современных комплексных систем информационной безопасности (КСИБ) возрастает их сложность. Снижение эффективности работы любого компонента может привести к нарушению нормального работоспособного состояния всей системы. Обеспечение нормальной работы КСИБ заключается в поддержании работоспособности всех частей системного оборудования. Для этого необходимо проводить периодическое тестирование с соответствующим анализом и оценкой эффективности каждого элемента. В инженерной практике данные тестирования оборудования обычно содержат системную и случайную ошибки. Важной задачей является минимизация этих ошибок при анализе эффективности работы всех частей КСИБ. Осуществление точной и достоверной оценки функционирования системы и ее компонентов является актуальной задачей, требующей решения.

В настоящей работе оценка эффективности функционирования систем информационной безопасности рассматривается как задача синтеза многомерных решений с использованием многопараметрических данных.

Анализ рассматриваемых моделей. В работе [1] проведено сравнение эффективности информационных систем путем анализа и расчета количества энтропии, которое связывают с временными параметрами обработки информации, при создании иерархической модели потока информации. Проанализированы примеры на базе радиолокационных структур. Авторы исследований соотносят оценку эффективности со сложностью технических и информационных структур, объемом временных потерь на обработку информационного потока. Доказано, что по обобщенному показателю количества информационной энтропии, возникающего в системе, сетевая структура эффективнее иерархической [1]. Предложено с помощью энтропии оценивать свойства информационных систем. Однако предлагаемый подход к оценке эффективности значительно зависит от параметров обрабатываемого потока.

В работе [2] дано описание математической модели оценки эффективности протокола взаимодействия систем цифровой радиосвязи стандартов APCO-25 и DRR. Приведен результат вычислительного эксперимента. Однако возникает вопрос определения иерархии критериев и расчета их весов.

В работе [3] предложено использовать элементы имитационного моделирования при исследовании практической эффективности систем защиты от сетевых кибератак. При этом выделены функционально значимые подсистемы для формирования структуры киберполигона. Приведены примеры реализации такого подхода для оценки эффективности систем обнаружения вторжений в ходе противодействия кибератакам. Авторы признают сложность задачи, так как необходимо учитывать большое число разнообразных факторов, связанных с процессом несанкционированного доступа.

В работе [4] предложена комплексная модель оценки эффективности обеспечения информационной безопасности автоматизированной системы управления технологическим процессом предприятия с использованием системы обнаружения вторжений. Отмечено, что в настоящее время не существует официально признанной методики оценки эффективности работы системы обнаружения вторжений для автоматизированной системы управления технологическим процессом. Несомненным преимуществом работы является практическая реализация оценки на российском предприятии (в Иркутской области) с генерацией предложений по модернизации системы.

В зарубежной литературе термин «эффективность», как правило, обозначают словом «performance», которое переводится еще и как «производительность, результативность», что создает определенную путаницу. В настоящей работе этот термин рассмат-

ривается именно как «эффективность». Также в ряде зарубежных работ описывается так называемый анализ, основанный на доказательствах, или анализ на основе базовых правил (БП).

В последние годы разработаны и широко используются некоторые методы, основанные на применении экспертных систем [6, 7]. В частности, предложен метод оценки эффективности для мониторинга сети, основанный на разделяемых временных экспоненциальных моделях случайного графа, который применим к независимым и автокоррелированным сетям. Проведен анализ развития моделей БП (Based on Basic Rules, BRB), основанный на применении экспертных систем и теории доказательств. Эти модели во многих странах широко применяются в сложных промышленных системах для получения таких параметров, как оценка надежности и производительности, диагностика неисправностей и т. д. Поскольку модель БП, по заключению авторов, может справляться с неопределенностью и двусмысленностью, разработана модель оценки безопасности, основанная на модели БП, для оценки безопасности сложных систем, которая может обеспечить интерпретируемость модели оценки.

В реальном процессе функционирования КСИБ рабочая среда является сложной и многофакторной, на систему влияют различного рода помехи. Данные тестирования часто содержат ошибки, что приводит к увеличению факторов неопределенности, влияющих на достоверность и точность данных. Невозможно эффективно бороться со случайными факторами, используя только данные о работе системы за предыдущий период, экспертные знания и модель функционирования. Необходимо в полной мере применять все виды информации, чтобы получить оценку в соответствии с реальной ситуацией. Точное числовое значение не может отразить небольшие динамические изменения в сложных условиях функционирования, особенно когда система подвержена влиянию различных видов шумов. Оценку эффективности сложных систем можно рассматривать как своего рода классификационную задачу, которая должна получить предпочтительный результат оценки в соответствии с некоторыми характеристиками или данными тестирования систем. Следовательно, задача оценки системы в реальных рабочих условиях может быть преобразована в задачу анализа решений с несколькими атрибутами в условиях интервальной неопределенности.

Структура КСИБ и принцип работы являются сложной системой [8, 9]. Использование подхода на основе БП для оценки ее эффективности может помочь качественно обрабатывать данные с неопределенной информацией, включая субъективные и объективные неопределенности, чтобы уменьшить влияние неопределенных факторов на результат оценки. Для применения этого метода к оценке эффективности КСИБ необходимо решить многоэтапную задачу.

Создание системы оценочных индексов. Сложные системы обычно характеризуются гибридной структурой, многопараметрическими индексами оценки, сложными коэффициентами связи и корреляции. Для моделирования и оценки сложных систем, как правило, используется модель на основе БП, с помощью которых агрегируются все измеримые показатели на нижнем уровне, чтобы получить результат оценки системы в целом. Эта операция кажется простой и линейной, но при этом игнорируется состояние каждой подсистемы или оборудования в системе. В процессе оценки эффективности или диагностики неисправностей необходимо изучить рабочее состояние подсистемы. Если эффективность некоторых подсистем не соответствует требованиям нормальной эксплуатации, их необходимо заменить, перенастроить или провести техническое обслуживание.

Модель, основанная на базовых правилах для оценки эффективности сложных систем с неопределенными параметрами. Оценим эффективность КСИБ как сложной системы на основе подхода БП с неопределенными параметрами. Предлагаемый метод объединяет разнообразные данные и оценивает эффективность подсистем внутри сложной системы. Системный анализ результатов оценки должен помочь лицам, принимающим решения, разработать стратегию использования и управления КСИБ. Структура предложенного подхода, основанного на БП, состоит из трех блоков (рис. 1).

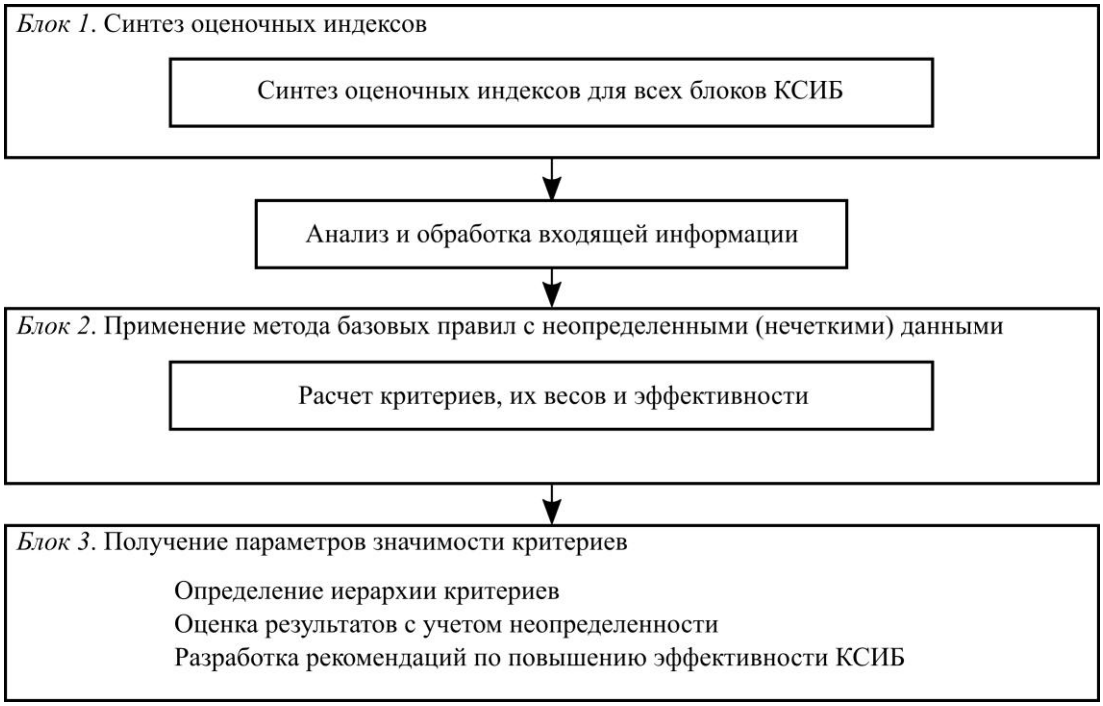


Рис. 1. Схема предлагаемого подхода к оценке эффективности сложных систем
Fig. 1. Scheme of the proposed approach to evaluating the effectiveness of complex systems

Синтез оценочных индексов является первым блоком предлагаемой модели. Второй блок – метод построения БП с неопределенными (нечеткими) элементами, который связан с неопределенностью входной информации. Третий блок – получение параметров значимости критериев, с помощью которых можно влиять на стратегии эксплуатации и управления.

Синтез системы индексов оценки эффективности сложных систем. Для того чтобы оценить эффективность сложных систем, необходимо разделить всю систему на несколько независимых подсистем на основе структуры и принципа работы системы. Если подсистемы имеют несколько степеней сложности, то их можно дополнительно разделять на более мелкие части до тех пор, пока не будут получены показатели более мелких частей. В соответствии с разделенной многоуровневой подсистемой строится индекс оценки. Для получения результата оценки снизу вверх используется подход БП. Результат оценки нижних индексов принимается в качестве обоснования доказательства верхних индексов, в итоге может быть получен результат оценки верхнего индекса. Схема оценочных показателей всей системы приведена на рис. 2.

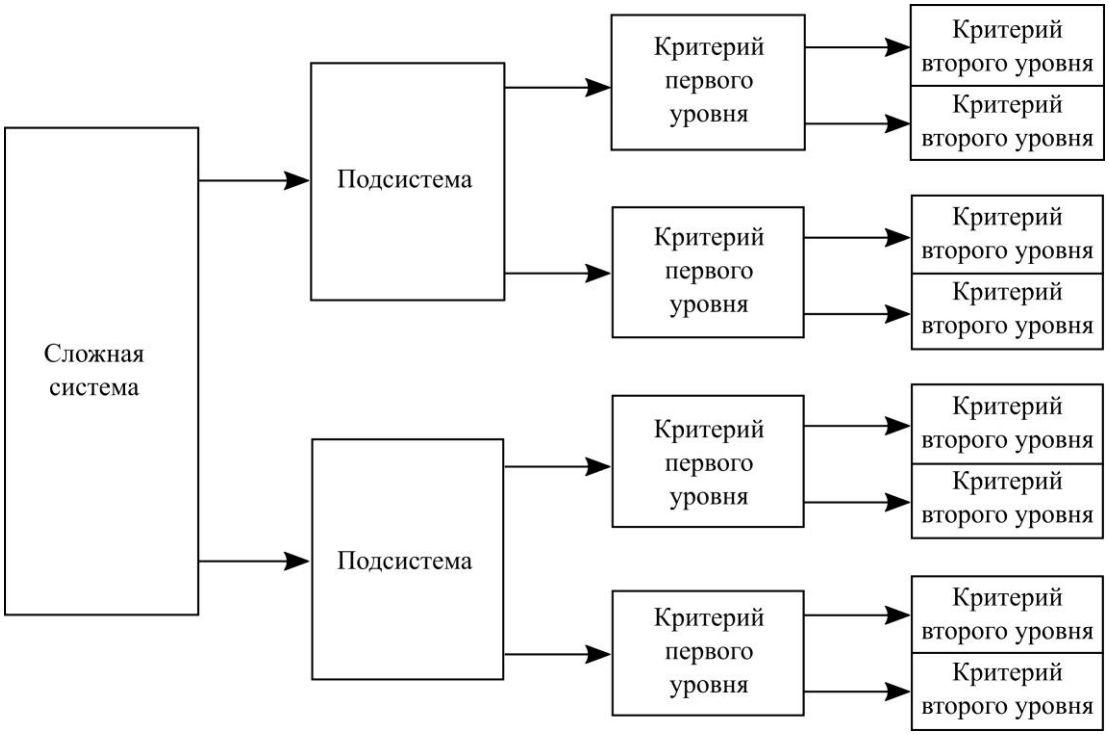


Рис. 2. Показатели эффективности сложных систем
Fig. 2. Performance indicators of complex systems

Учитывая, что реальная система может быть более сложной, структура системы не может быть просто разделена на несколько независимых частей. Между индексами каждого слоя существуют взаимосвязи, которые влияют друг на друга. Предложенный метод оценки применим только к системе, которая разделена на кластеры (см. рис. 2). Если системы не могут быть разделены на несколько независимых блоков, это означает, что некоторые блоки являются зависимыми и предложенный метод должен быть дополнен структурой, оценивающей взаимное влияние блоков. В работе [7] определен индекс взаимозависимости элементов системы в пространстве критериев для анализа взаимосвязи между ними. Индекс взаимозависимости может быть измерен с помощью функций предельного и совместного правдоподобия. Поскольку основная масса критериев носит вероятностный характер и генерируется на основе функций правдоподобия, индекс взаимозависимости может использоваться в рамках модели БП.

На рис. 3 приведен пример трехслойной структуры системы, используемой для иллюстрации процесса моделирования. Индекс верхнего уровня – это эффективность объекта оценки, средний уровень – расчет промежуточных индексов для подсистем, нижний уровень – измеряемый оценочный индекс.

Поскольку нижние индексы поддаются измерению, данные могут быть интегрированы для получения результата оценки промежуточного индекса. Предположим, что l_i и p_i – это соответственно вес и оценка эффективности параметров k_i среди нижних индексов. Степень достоверности $b_{n,i}$ получается путем преобразования входной информации в n-ю оценку (n = 1, 2, ..., N). Степень достоверности $b_{n,1}(r_1)$ промежуточного индекса r_1 получается путем объединения k_1 и k_2. Аналогично k_3 и k_4 объединяются для получения результата оценки $b_{n,2}(r_2)$ промежуточного индекса r_2.

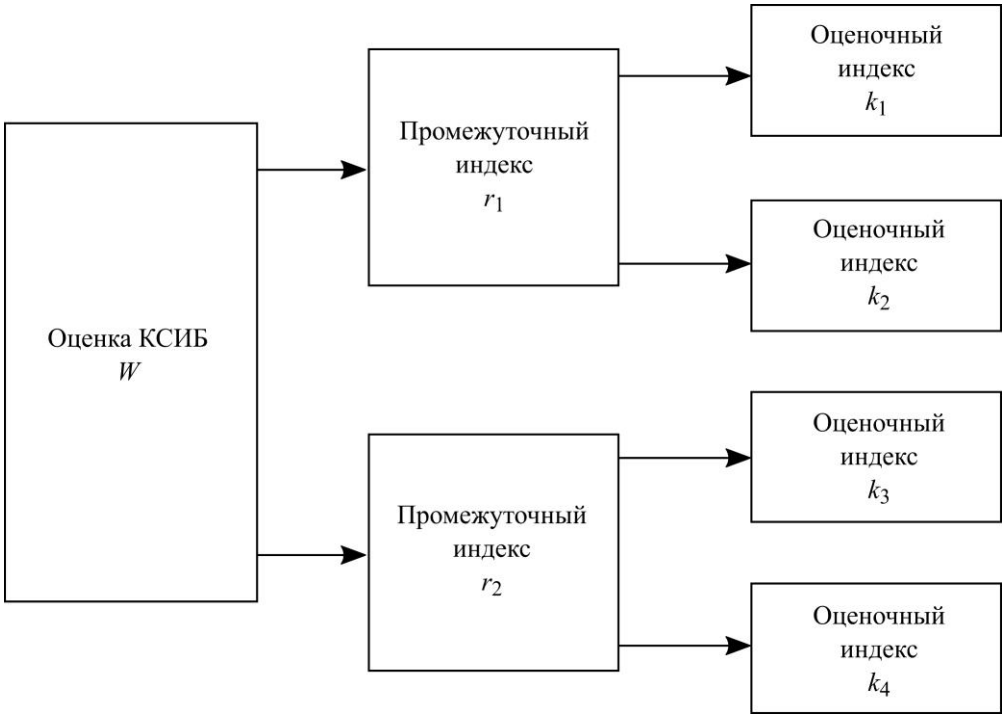


Рис. 3. Показатели производительности трехслойной системы
Fig. 3. Performance indicators of the three-layer system

После получения $b_{n,1}(r_1)$ и $b_{n,2}(r_2)$ промежуточные индексы необходимо объединить, чтобы получить результат оценки объекта W. Результат оценки промежуточных индексов представлен в виде степени достоверности, далее следует рассчитать вес и надежность. Примем, что максимальное значение общего веса равно 1, а минимальное значение – это максимальное значение каждого критерия. Общий вес определяется как

$$l_{k(E)} = (\max(l_i), 1).$$

Общая достоверность является функцией общего веса, которая рассчитывается согласно выражению

$$p_{k(\mathrm{E})}(l_{k(E)}) = \frac{1 - r_{G(Q),k(E)}(1 + l_{k(E)})}{1 - r_{G(Q),k(E)}}, \quad (1)$$

где E – количество критериев; $r_{G(Q),k(E)}$ – критерий остаточной достоверности, не попавший ни в один класс.

Тогда общая достоверность имеет вид

$$p_{k(\mathrm{E})}(l_{k(E)}) \in [p_{k(\mathrm{E})}(1), p_{k(\mathrm{E})}(\max(\omega_i))]. \quad (2)$$

Согласно уравнениям (1) и (2) базовые массы вероятности промежуточных индексов агрегируются для получения результата оценки индекса верхнего уровня. Предположим, что интервальный порог достоверности промежуточного показателя r_1 попадает в интервал $[p_{k(\mathrm{E})}(r_1)^-, p_{k(\mathrm{E})}(r_1)^+]$, а интервальный порог веса равен $[l^-_{k(E)}(r_1), 1]$. Интервальный порог достоверности промежуточного показателя r_2 равен $[p_{k(\mathrm{E})}(r_2)^-, p_{k(\mathrm{E})}(r_2)^+]$, а интервальный порог веса равен $[l^-_{k(E)}(r_2), 1]$.

Поскольку достоверность и вес не являются точными значениями, традиционный подход БП не применим для получения окончательной степени достоверности $b_{n,1}(W)$. Для решения этой проблемы можно использовать метод БП с неопределенными параметрами.

Использование базовых правил с комбинацией нескольких интервальных структур. В инженерной практике бывает трудно получить точное значение некоторых индексов. Кроме того, в процессе тестирования часто возникают различного рода ошибки, которые приводят к неопределенности в данных, некоторые показатели не могут быть измерены и их необходимо определять с помощью экспертных знаний. Однако из-за объективных ситуаций лица, принимающие решения, часто не могут дать точную оценку, что порождает субъективную неопределенность.

Данные в интервальном виде превосходят метод определения значения в точке, что в основном отражается в следующих аспектах: значения интервальных данных более достоверные и научные, чем данные в точке при выражении неопределенной информации. Задание интервальных данных является более точными, чем данных в точке, для выражения большего количества информации. Значения интервала могут эффективно снизить частоту ошибок. Поскольку в объеме интервальных операций содержатся все возможные реальные значения, интервальные данные более значимы для практических применений. Таким образом, в методе БП для оценки эффективности системы используются интервальные параметры вместо точных параметров, что больше соответствует инженерным характеристикам.

Определим подход БП к оценке достоверности. Предположим, что есть две части независимых критериев k_1 и k_2. Оценочные баллы – H_1 и H_2. Критерии k_1 и k_2 соответствуют следующему описанию:

$$k_i = [(H_n, b_{n,i}), \to n = 1, 2, i = 1, 2],$$

где $b_{n,i}$ – степень уверенности n-й оценки $H_{n\,i}$-го критерия.

Тогда p_1 и p_2 – достоверность критериев, l_1 и l_2 – их веса. Обозначим гибридный вес l':

$$l_i' = l_i / (1 + l_i - p_i).$$

Основные значения промежуточных индексов или вероятностей могут быть получены в виде

$$r_{n,i} = l_n' b_{n,i}, \quad r_{H,i} = 1 - l_i' \sum_{n=1}^{N} b_{n,i}, \quad \bar{r}_{H,i} = 1 - l_i', \quad r_{H,i}' = l_i' \left(1 - \sum_{n=1}^{N} b_{n,i}\right),$$

где $\bar{r}_{H,i}$ – основные значения вероятностей, генерируемые относительной важностью критериев; $r_{H,i}'$ – основные значения вероятности, вызванные неполнотой оценки; $r_{H,i} = \bar{r}_{H,i} + r_{H,i}'$ – результирующие значения вероятности после агрегирования.

Соотношение между основными значениями вероятности и степенью достоверности удовлетворяет приведенным уравнениям.

Предположим, что достоверность критериев и вес критериев – интервальные значения. Тогда $l_i^- \le l_i \le l_i^+$, $p_i^- \le p_i \le p_i^+$. Здесь l_i^+ и l_i^- $(0 \le l_i^- \le l_i^+ \le 1)$ являются верхней и нижней границами интервала значений веса соответственно, p_i^+ и p_i^- $(0 \le p_i^- \le p_i^+ \le 1)$ – верхней и нижней границами интервала значений достоверности. Если гибридный вес есть пороговое значение интервала, то полученные базовые значения вероятности так-

же являются пороговым значением интервала. Интервальные базовые значения вероятностей равны:

$$r_{n,i} = r_i(H_n) \in [r_{n,i}^{-}, r_{n,i}^{+}] = [l_i^{\smile} b_{n,i}, l_i^{\frown} b_{n,i}], \text{ где } n = 1, 2, \ldots, N;\ i = 1, 2, \ldots, E,$$

$$r_{H,i} = 1 - l_i^{`} \sum_{n=1}^{N} b_{n,i}, \text{ где } i = 1, 2, \ldots, E,$$

$$\bar{r}_{H,i} = \bar{r}_i(H) = (1 - l_i^{`}) \in [1 - l_i^{\frown}, 1 - l_i^{\smile}], \text{ где } i = 1, 2, \ldots, E,$$

$$r_{n,i}^{`} = r_i^{`}(H_n) \in [r_{n,i}^{\smile}, r_{n,i}^{\frown}] = [l_i^{\smile} b_{n,i}, l_i^{\frown} b_{n,i}], \text{ где } i = 1, 2, \ldots, E.$$

При этом учтем, что сумма вероятностей (критериев) равна единице:

$$\sum_{n=1}^{N} r_{n,i} + \overline{r_{H,i}} + r_{H,i}^{`} = 1.$$

Следовательно, достоверность оценочных баллов может быть преобразована в базовые значения вероятности. После получения базовых интервальных значений вероятности можно объединить несколько значений вероятности, используя метод БП.

Комбинация базовых интервальных значений вероятности. Рекурсивная комбинация из E фрагментов критериев с использованием метода БП получается следующим способом:

$$r_{n,k(E)} = D_{k(E)} (r_{n,k(E-1)} r_{n,E} + r_{n,k(E-1)} r_{H,E} + r_{H,k(E-1)} r_{n,E}),$$

$$\bar{r}_{H,k(E)} = D_{k(E)} (\bar{r}_{H,k(E-1)} \bar{r}_{H,E}),$$

$$r'_{H,k(E)} = D_{k(E)} (r'_{H,k(E-1)} \bar{r}_{H,E} + \bar{r}_{H,k(E-1)} r'_{H,E} + r'_{H,k(E-1)} r'_{H,E}),$$

$$r_{H,k(E)} = \bar{r}_{H,k(E)} + r'_{H,k(E)},$$

$$D_{k(E)} = \left(1 - \sum_{t=1}^{2} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq t}}^{2} r_{t,k(E-1)} r_{j,E}\right)^{-1}.$$

Необходимо оптимизировать комбинацию критериев, чтобы получить оптимальный диапазон значений. Если требуется объединить несколько критериев, сначала нужно объединить первый и второй критерии. Затем они могут быть объединены с третьим критерием и т. д. Когда будет получен окончательный результат, можно проводить общую оптимизацию. Могут быть получены верхняя и нижняя границы интервала конечного результата. Взяв в качестве примера комбинацию трех доказательств k_1, k_2 и k_3, основные массы вероятности присваиваются как p_1, p_2 и p_3. Сначала необходимо объединить r_1 и r_2, а затем результаты можно объединить с r_3.

Таким образом, может быть проведена общая оптимизация. Комбинация r_1 и r_2 задается с помощью выражений:

$$r_{1-2}(H_i) = \frac{r_1(H_i) r_2(H_i) + r_1(H_i) r_2(H) + r_1(H) r_2(H_i)}{1 - \sum_{t=1}^{3} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq t}}^{3} r_1(H_t) r_2(H_j)}, \text{ где } i = 1, 2, 3,$$

$$r_{1-2}(H) = \frac{r_1(H) r_2(H)}{1 - \sum_{t=1}^{3} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq t}}^{3} r_1(H_t) r_2(H_j)}.$$

Результат после комбинации с r_3 выражается следующим образом:

$$r(H_i)=\frac{r_{1-2}(H_i)r_3(H_i)+r_{1-2}(H_i)r_3(H)+r_{1-2}(H)r_3(H_i)}{1-\sum_{t=1}^{3}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq t}}^{3}r_{1-2}(H_t)r_3(H_j)},\ \text{где } i=1, 2, 3,$$

$$r(H)=\frac{r_{1-2}(H)r_3(H)}{1-\sum_{t=1}^{3}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq t}}^{3}r_{1-2}(H_t)r_3(H_j)},$$

$$b_n=r_{n,k(E)}\big/1-\bar{r}_{H,k(E)},\ \text{где } n=1, 2, \ldots, N,$$

$$b_H=r`_{n,k(E)}\big/1-\bar{r}_{H,k(E)}.$$

На основе приведенных вычислений получаем степени достоверности соответствующих классов.

Следует отметить, что при объединении каждой части критериев, оптимизации каждой части и при использовании в качестве последующего значения интервала оптимальный интервал могут быть получены некоторые неправильные результаты. Для задачи ограниченной оптимизации результаты, полученные при оптимизации каждой части, являются только оптимальным решением в каждой части, а не глобально оптимальным решением. Следовательно, все ограничения и комбинированные процессы должны быть объединены для оптимизации объекта, чтобы можно было гарантировать, что полученный результат будет глобально оптимальным.

Применение каскадного метода анализа иерархий для ранжирования и отбора наиболее влиятельных критериев. Отдельный вопрос – выбор критериев для оценки эффективности. В КСИБ как в сложной системе, содержащей десятки подсистем, критериев для оценки существует множество. Необходимо выбрать из них самые достоверные и точные. Для этого предлагается использовать каскадный метод анализа иерархий [8–10]. Однако в данном методе достаточно много субъективизма. Предлагается его уменьшить. Для этого метод следует разделить на две части: первая – субъективная (выбор критериев и решений и их ранжирование), вторая – объективная (расчет нормированного вектора приоритетов и элементов матриц), не зависящая от решений человека. В реализации первой части результаты сильно зависят от лиц, принимающих решение. Для повышения объективности предлагается использовать метод анализа иерархий в каскадном варианте. Его суть заключается в следующем. Образуются три группы лиц, принимающих решение, – независимые эксперты, руководители объекта и пользователи (специалисты, эксплуатирующие КСИБ после внедрения). Эти три группы совместно выбирают список решений (модификаций предполагаемой КСИБ) и список критериев. Но ранжирование каждая группа проводит по-своему, и матрицы каждая группа составляет на свое усмотрение. Далее проводятся три группы расчетов, получая три группы нормированного вектора приоритетов для критериев и три группы этого вектора для решений. Затем рассчитывается нормированный вектор приоритетов K_i для матрицы, где в строках – значения нормированного вектора приоритетов критериев K_j для каждой группы лиц, принимающих решение. Для нормирования итоговых нормированных векторов приоритетов для каждой группы лиц, принимающих решение, используется среднее значение K_i по всем группам анализа [9]. Это позволяет свести к минимуму субъективные погрешности, возникающие при разработке правил и критериев.

Заключение. Проведенный анализ методов оценки эффективности различных систем подтвердил, что в инженерной практике важно контролировать эффективность сложных систем для своевременной модернизации и создания блоков противодействия вновь возникающим рискам.

Декомпозиция КСИБ как сложной многоуровневой системы обоснована для синтеза нового метода оценки эффективности сложных систем. Предложенная многоуровневая система индексов оценки эффективности сложных систем моделируется на основе структуры системы и принципов ее работы. На этой основе создается система БП.

Для уменьшения влияния ошибок и помех в информации или неточностей экспертных знаний достоверность и вес критериев предлагается определять пороговыми значениями интервалов, которые соответствуют инженерной практике. Анализ чувствительности, достоверности и веса критериев в модели БП проводится для получения эффективности каждой подсистемы или компонента. Кроме того, метод может использоваться для определения основных факторов, влияющих на результат оценки эффективности. После анализа оценок может быть предусмотрена стратегия технического обслуживания и модернизации системы для поддержания нормальной работы, повышения эффективности и наращивания функционала.

В дальнейшем необходимо разработать модель оптимизации предлагаемого метода и провести анализ комбинирования зависимых критериев для получения более точных и надежных данных.

Литература

1. ***Пальгуев Д. А.*** Сравнительная оценка эффективности информационных систем иерархической и сетевой структуры на основе энтропийного подхода // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 1 (37). С. 15–22. EDN: VSGJMO.

2. ***Пьянков О. В., Попов А. В.*** Математическая модель оценки эффективности протокола взаимодействия систем цифровой радиосвязи // Вестник Воронежского института МВД России. 2021. № 4. С. 124–130. EDN: QHHHTE.

3. ***Жуков М. М., Баркалов Ю. М., Телков А. Ю.*** Методологический подход к имитационному моделированию при исследовании практической эффективности систем защиты от сетевых кибератак // Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 1. С. 24–39. EDN: QZCUMQ.

4. ***Голдобина А. С., Исаева Ю. А., Никулин Д. М.*** Оценка эффективности систем обнаружения вторжения в информационной системе управления производством оборонно-промышленного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 6. № 1. С. 99–103. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-6-1-99-103. – EDN: IZNNTY.

5. A survey of belief rule-base expert system / ***Z.-J. Zhou, G.-Y. Hu, C.-H. Hu et al.*** // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst. 2019. Vol. 51. No. 8. P. 4944–4958. https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2944893

6. A safety assessment model based on belief rule base with new optimization method / ***Zh. Feng, Zh. Zhou, Ch. Hu et al.*** // Reliab. Eng. Syst. Saf. 2020. Vol. 203. Art. ID: 107055. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107055

7. ***Yang J.-B., Xu D.-L.*** Evidential reasoning rule for evidence combination // Artif. Intell. 2013. Vol. 205. P. 1–29. https://doi.org/10.1016/j.artint.2013.09.003

8. ***Lubentsov A. V., Bobrov V. N., Desytov D. B., Noev A. N.*** The advantage of the method of hierarchy analysis, the statistical methods of decision support // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1203. Art. No. 012079. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012079

9. ***Лубенцов А. В.*** Использование каскадного метода анализа иерархий для оценки эффективности комплексной системы безопасности // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2022. № 4. С. 113–120. EDN: OCNMJX.

10. ***Лубенцов А. В., Душкин А. В.*** Комплексные системы безопасности: системный анализ, архитектура, управление жизненным циклом. Воронеж: Научная книга, 2022. 245 с.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 12.10.2023 г.;
принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторе

Лубенцов Александр Витальевич – кандидат географических наук, доцент кафедры общей радиотехники и электроники Воронежского института Федеральной службы исполнения наказаний России (Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1А), lubencov@mail.ru

References

1. Palguev D. A. Efficiency comparative evaluation of information systems of hierarchical and network structure based on entropy approach. *Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnyye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*, 2020, no. 1 (37), pp. 15–22. (In Russian). EDN: VSGJMO.

2. Pyankov O. V., Popov A. V. Mathematical model for estimating efficiency of digital radio communication system interaction protocol. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Interior of Russia*, 2021, no. 4, pp. 124–130. (In Russian). EDN: QHHHTE.

3. Zhukov M. M., Barkalov Yu. M., Telkov A. Yu. Methodological approach to simulation modeling in studying the practical efficiency of protection system against network cyber attacks. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Interior of Russia*, 2022, no. 1, pp. 24–39. (In Russian). EDN: QZCUMQ.

4. Goldobina A. S., Isaeva Ju. A., Nikulin D. M. Evaluation of the efficiency of intrusion detection systems in production management information system of a military-industrial complex. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 99–103. (In Russian). https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-6-1-99-103. – EDN: IZNNTY.

5. Zhou Z.-J., Hu G.-Y., Hu C.-H., Wen C.-L., Chang L.-L. A survey of belief rule-base expert system. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, 2019, vol. 51, no. 8, pp. 4944–4958. https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2944893

6. Feng Zh., Zhou Zh., Hu Ch., Ban X., Hu G. A safety assessment model based on belief rule base with new optimization method. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2020, vol. 203, art. ID: 107055. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107055

7. Yang J.-B., Xu D.-L. Evidential reasoning rule for evidence combination. *Artif. Intell.*, 2013, vol. 205, pp. 1–29. https://doi.org/10.1016/j.artint.2013.09.003

8. Lubentsov A. V., Bobrov V. N., Desytov D. B., Noev A. N. The advantage of the method of hierarchy analysis, the statistical methods of decision support. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1203, art. no. 012079. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012079

9. Lubentsov A. V. Using the cascade hierarchy analysis method to evaluate the effectiveness of an integrated security system. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service*, 2022, no. 4, pp. 113–120. (In Russian). EDN: OCNMJX.

10. Lubentsov A. V., Dushkin A. V. *Integrated security systems: system analysis, architecture, lifecycle management.* Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2022. 245 p. (In Russian).

The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 12.10.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the author

Alexander V. Lubentsov – Cand. Sci. (Geog.), Assoc. Prof. of the General Radio Engineering and Electronics Department, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (Russia, 394072, Voronezh, Irkutskaya st., 1A), lubencov@mail.ru

КОНФЕРЕНЦИИ
CONFERENCES

XXXI Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием

Национальный исследовательский университет «МИЭТ» проводит 25–26 апреля 2024 г. *XXXI Всероссийскую межвузовскую научно-техническую конференцию студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием*.

Научные направления работы конференции (секции):

1. Материалы микро- и наноэлектроники.
2. Проектирование ИС и электронных компонентов.
3. Оборудование и технология полупроводниковых приборов и ИС.
4. Сенсоры и микромеханика.
5. Информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства.
6. Радиотехника, системы и устройства связи и телекоммуникаций.
7. Информационные системы и технологии в цифровой экономике.
8. Информационная безопасность.
9. Биомедицинская электроника.
10. Техносферная безопасность.
11. Менеджмент, маркетинг, инновации наукоемких предприятий.

Форма участия в работе конференции – выступление на секции с докладом продолжительностью до 10 минут.

Работы, подготовленные в строгом соответствии с требованиями к оформлению и представлению, будут опубликованы в сборнике тезисов докладов «Микроэлектроника и информатика – 2024».

По итогам конференции проводится конкурс работ студентов и аспирантов, авторами которых являются только студенты или только аспиранты. Лучшие доклады, отобранные организационным комитетом, будут рекомендованы к публикации в сборнике статей «Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика – 2024» с размещением в РИНЦ.

Ознакомиться с требованиями к представлению и оформлению тезисов и докладов можно на сайте МИЭТ в разделе «Наука и инновации», «Конференции и семинары»: htpp://www.miet.ru/page/161370.

Важные даты:

14.03.2024 г. – последний срок представления материалов;
до 21.03.2024 г. – рассмотрение представленных докладов;
25.03–29.03.2024 г. – рассылка информации о принятии докладов (письмо-приглашение);
25.04– 6.04.2024 г. – работа секций конференции.

Ответственный секретарь Оргкомитета конференции – Грязнева Татьяна Алексеевна.

Адрес Оргкомитета: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1. Национальный исследовательский университет «МИЭТ». ОНР, конференция «Микроэлектроника и информатика – 2024».

Тел.: +7-499-720-85-30

E-mail: id@miee.ru (для справок)

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал **«Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА»** публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- **фундаментальные исследования;**
- **материалы электроники;**
- **технологические процессы и маршруты;**
- **элементы интегральной электроники;**
- **схемотехника и проектирование;**
- **микро- и наносистемная техника;**
- **интегральные радиоэлектронные устройства;**
- **биомедицинская электроника;**
- **информационно-коммуникационные технологии;**
- **проблемы высшего образования.**

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в двух экземплярах.***
2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.
3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).
4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: http://ivuz-e.ru/authors/

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна быть структурирована и содержать: введение; основную часть; заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

– на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;

– на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать ***ключевые слова*** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

– печатается ***через два интервала*** с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

– абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только ***по умолчанию.*** Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, PDF, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

– оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

– нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

– русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык (для References).

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

– оформляется отдельным файлом;

– необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

– указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru

ПОДПИСКА 2024

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

Периодичность журнала – 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



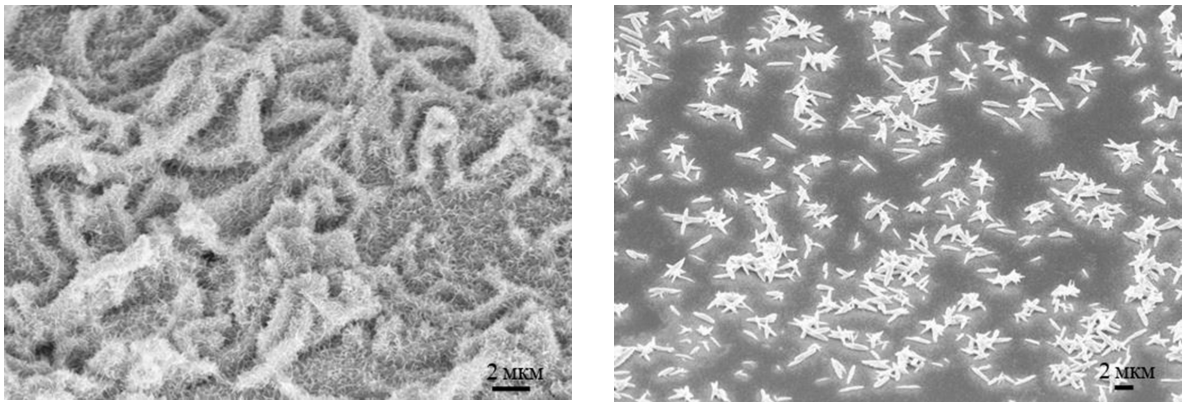
Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, дом 1, МИЭТ, комн. 7231

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru

К статье: Шомахов З. В., Налимова С. С., Гукетлов А. М., Кондратьев В. М., Мошников В. А. Управление свойствами адсорбционных центров при формировании газочувствительных структур смешанных оксидов, с. 7



а *б*

Рис. 2. РЭМ-изображения образцов: *а* – ZnO-Fe; *б* – ZnO-Sn
Fig. 2. Scanning electron microscopy of samples: *a* – ZnO-Fe; *b* – ZnO-Sn

К статье: Румянцев А. В., Боргардт Н. И. Сравнение процессов распыления кремния и диоксида кремния фокусированным ионным пучком, с. 30

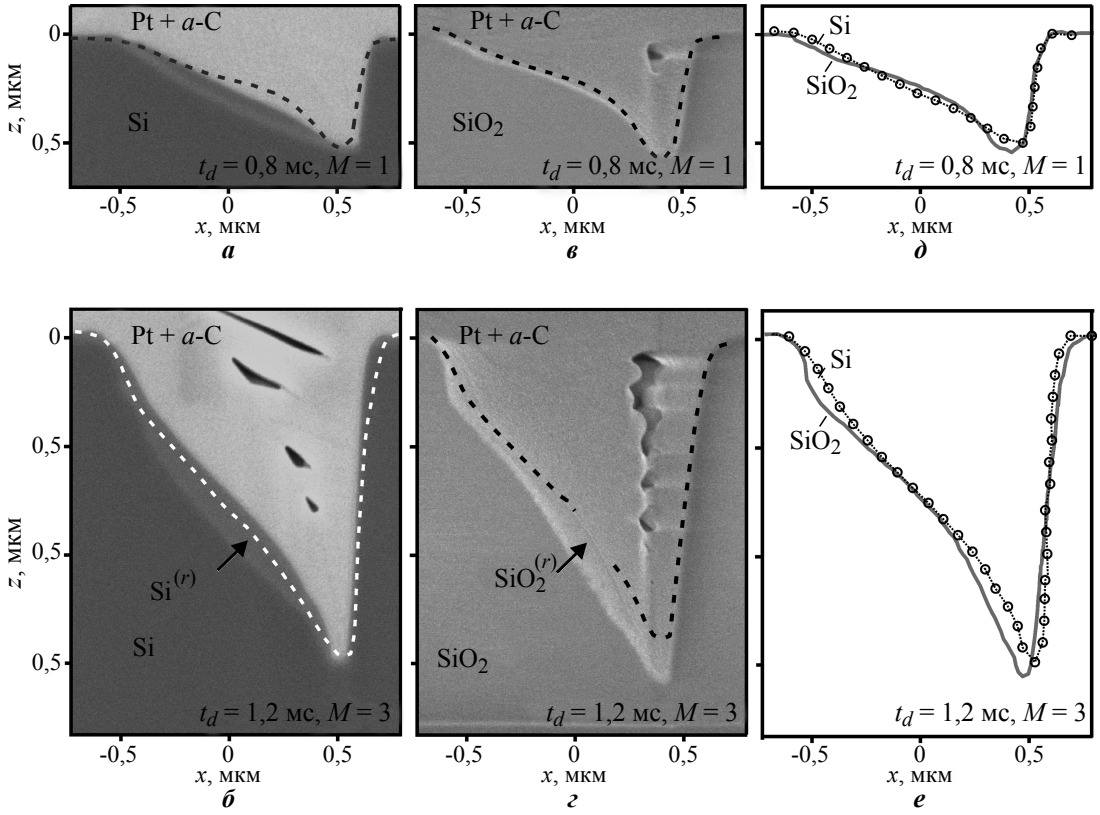


Рис. 1. Экспериментальные РЭМ-изображения поперечных сечений углублений с низким (*а*, *в*) и высоким (*б*, *г*) аспектным отношением с наложенными расчетными профилями и извлеченные из РЭМ-изображений и наложенные друг на друга экспериментальные профили для структур с низким (*д*) и высоким (*е*) аспектным отношением

Fig. 1. Experimental SEM images of the cross sections of rectangular boxes with low (*a*, *c*) and high (*b*, *d*) aspect ratios with superimposed calculated profiles and experimental profiles of structures with low (*e*) and high (*f*) aspect ratios extracted from the images and superimposed on each other