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
№ 2 | No. 2
март – апрель | March – April
2024

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): https://www.ural-press.ru/catalog
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- **через Агентство** «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- **через редакцию** – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 29, № 2, 2024
март – апрель

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

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., 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 11.04.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 14,88 усл.печ.л., 12,976 уч.-изд.л. Тираж 120 экз. Заказ № 12. 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

Налимова С. С., Шомахов З. В., Мошников В. А. Разработка слоев на основе оксида молибдена для полупроводниковых газовых датчиков 139

Пепеляев Д. В., Корчагин Е. П., Штерн М. Ю., Рогачёв М. С., Терехов Д. Ю., Бурзин С. Б., Штерн Ю. И., Шерченков А. А. Исследование концентрации и подвижности носителей заряда в наноструктурированных термоэлектрических материалах на основе PbTe и GeTe 147

Технологические процессы и маршруты

Лазаренко П. И. Измерительный комплекс для исследования температурных зависимостей электрического сопротивления халькогенидных материалов в твердом и жидком состояниях 158

Грабов А. Б., Рискин Д. Д., Суздальцев С. Ю., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А. Исследование роли гидростатических эффектов в слое расплава олова в формировании вакуумно-плотного SLID-соединения Cu-Sn 168

Элементы интегральной электроники

Пилькевич А. В., Садков В. Д. Влияние импульсной мощности на параметры пленочных поглощающих элементов 175

Схемотехника и проектирование

Чистяков А. Ю., Заплетина М. А. Деревья обратного прохода на смешанном коммутационном графе для ускоренной трассировки ПЛИС 185

Микро- и наносистемная техника

Челышев Л. С., Тимошенков С. П., Плис Н. И., Орлов В. О. Многофункциональный сенсорный модуль повышенной защищенности со спутниковой навигацией 194

Интегральные радиоэлектронные устройства

Зикий А. Н., Кочубей А. С. Исследование характеристик управляемого генератора 10-см диапазона 203

Биомедицинская электроника

Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П., Погодин В. Р., Лазба Ф. Б. Разработка портативной системы длительного кардиомониторирования на основе емкостных биосенсоров и эластичных межсоединений 210

Буянов Д. А., Шалаев П. В., Монахова П. А., Герасименко А. Ю. Мониторинг оксигенации гемоглобина с помощью прибора NIRS4 и разработанного алгоритма 223

Информационно-коммуникационные технологии

Лубенцов А. В. Синтез иерархической многоуровневой модели параметров для оценки эффективности системы защиты информации в условиях неопределенных данных 236

Воеводин В. А. О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. I. Постановка задачи 249

Юбилеи

Лабунову Владимиру Архиповичу – 85 лет 257

Петросянцу Константину Орестовичу – 80 лет 258

К сведению авторов 259

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 29, No. 2, 2024
March – April
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 11.04.2024. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 14,88. Number of copies 120. Order no. 12. 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

Nalimova S. S., Shomakhov Z. V., Moshnikov V. A. Development of layers based on molybdenum oxide for semiconductor gas sensors 139

Pepelyaev D. V., Korchagin E. P., Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Terekhov D. Yu., Bursin S. B., Shtern Yu. I., Sherchenkov A. A. Investigation of the concentration and mobility of charge carriers in nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe and GeTe 147

Technological processes and routes

Lazarenko P. I. Measuring complex for studying temperature dependence of the electrical resistance of chalcogenide materials in the solid and molten states 158

Grabov A. B., Riskin D. D., Suzdaltsev S. Yu., Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A. Study on the role of hydrostatic effects in molten Sn layer in the formation of a vacuum-tight SLID coupling of Cu-Sn 168

Integrated electronics elements

Pilkevich A. V., Sadkov V. D. The effect of pulse power on the parameters of film absorbing elements 175

Circuit engineering and design

Chistiakov A. Yu., Zapletina M. A. Backpass trees on a mixed route graph for accelerated FPGA routing 185

Micro- and nanosystem technology

Chelyshev L. S., Timoshenkov S. P., Plis N. I., Orlov V. O. Multifunctional sensor module of increased security with satellite navigation 194

Integrated radioelectronic devices

Zikiy A. N., Kochubey A. S. Research of the characteristics of a controlled 10-cm range generator 203

Biomedical electronics

Gorlov N. S., Vertyanov D. V., Timoshenkov S. P., Pogodin V. R., Lazba F. B. Development of a portable long-term cardiac monitoring system based on capacitive biosensors and stretchable interconnections 210

Buyanov D. A., Shalaev P. V., Monakhova P. A., Gerasimenko A. Yu. Monitoring of hemoglobin oxygenation using the NIRS4 device and the developed algorithm 223

Information-communication technologies

Lubentsov A. V. Synthesis of a hierarchical multilevel parameter model for evaluating the effectiveness of an information security system under conditions of uncertain data 236

Voevodin V. A. On the task of assessing the stability of the functioning of information infrastructure elements exposed to information security threats. I. Problem statement 249

Anniversaries

Labunov Vladimir Arkhipovich is 85 years old 257

Petrosyants Konstantin Orestovich is 80 years old 258

Instruction for authors 259

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 621.382
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-139-146
EDN: SVXGUG

Разработка слоев на основе оксида молибдена для полупроводниковых газовых датчиков

***С. С. Налимова*[1], *З. В. Шомахов*[2], *В. А. Мошников*[1]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия*

shozamir@yandex.ru

Аннотация. При разработке газовых датчиков важное значение имеет выбор подходящего газочувствительного материала. В настоящее время большой интерес представляют разработка новых газочувствительных слоев на основе оксида молибдена MoO_3 и улучшение их сенсорных характеристик. В работе газочувствительный слой MoO_3 получен гидротермальным методом с последующим отжигом при температуре 400 °С в течение 2 ч. Элементный состав поверхности полученного образца проанализирован с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Проведены исследования сенсорного отклика, времени отклика и восстановления газочувствительного слоя к парам изопропилового спирта при различных рабочих температурах. Показано, что химический состав соответствует MoO_3, но на поверхности также наблюдаются адсорбированные гидроксильные группы. Анализ сенсорных свойств показал, что чувствительность при температурах 250 и 150 °С составляет соответственно 13,3 и 5,5. Установлено, что синтезированные гидротермальным методом слои на основе наночастиц MoO_3 проявляют чувствительность к парам изопропилового спирта уже при температуре 150 °С.

Ключевые слова: оксид молибдена, гидротермальный синтез, газовый датчик, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, поверхность

Для цитирования: Налимова С. С., Шомахов З. В., Мошников В. А. Разработка слоев на основе оксида молибдена для полупроводниковых газовых датчиков // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 139–146. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-139-146. – EDN: SVXGUG.

© С. С. Налимова, З. В. Шомахов, В. А. Мошников, 2024

Original article

Development of layers based on molybdenum oxide for semiconductor gas sensors

S. S. Nalimova[1], Z. V. Shomakhov[2], V. A. Moshnikov[1]

[1]Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia
[2]Kabardino-Balkarian State University named after H. N. Berbekov, Nalchik, Russia

shozamir@yandex.ru

Abstract. During gas sensors development the selection of an appropriate gas-sensing material is essential. Currently, the development of new gas-sensitive layers based on molybdenum oxide MoO_3 and the improvement of their sensor characteristics are of great interest. In this work, a gas-sensitive layer of MoO_3 was obtained by hydrothermal method followed by annealing at 400 °C for 2 hours. The surface elemental composition of the produced sample was analyzed by X-ray photoelectron spectroscopy. The sensor response, response and recovery times of the gas-sensitive layer were studied to isopropyl alcohol vapors at different working temperatures. It was shown that chemical composition corresponds to MoO_3, but adsorbed hydroxyl groups are also observed on the surface. The analysis of sensor properties showed that the sensitivity at 250 and 150 °C is 13.3 and 5.5 respectively. It has been established that the layers synthesized by the hydrothermal method based on MoO_3 demonstrate sensibility to isopropyl alcohol vapors even at 150 °C.

Keywords: molybdenum oxide, hydrothermal synthesis, gas sensor, X-ray photoelectron spectroscopy, surface

For citation: Nalimova S. S., Shomakhov Z. V., Moshnikov V. A. Development of layers based on molybdenum oxide for semiconductor gas sensors. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 139–146. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-139-146. – EDN: SVXGUG.

Введение. На сегодняшний день газоанализаторы находят широкое применение в сенсорике для выявления наличия горючих и токсичных газообразных веществ. Они также могут быть востребованы, например, в промышленности для обеспечения безопасности персонала. Другой перспективной областью применения газоанализаторов является медицина, в частности диагностика заболеваний и оценка эффективности терапии согласно анализу выдыхаемого воздуха. При этом важная задача – выбор подходящего материала для чувствительного элемента газового датчика.

Газовые датчики на основе оксидов металлов, обладающих полупроводниковыми свойствами, отличаются своей надежностью. Исследования этой группы датчиков проводятся в течение нескольких десятилетий. К настоящему времени разработаны приемы управления морфологией поверхности оксидов металлов и синтеза наночастиц различной формы (наностержней, нанотрубок, наноигл, нанопластинок, иерархических структур). Газовые датчики, полученные из полупроводниковых оксидов металлов с наноразмерными частицами, имеют такие преимущества, как дешевизна, простота изготовления, компактные размеры, высокий отклик и быстродействие, малое энергопо-

требление, а также применимость для обнаружения большого числа газообразных веществ.

Наночастицы оксида молибдена MoO_3 имеют высокую реакционную способность и высокую долговременную стабильность. Разработан датчик для обнаружения триметиламина на основе иерархического MoO_3 [1], работающий при температуре 250 °C с пределом обнаружения 0,5 ppm и откликом, равным 416. В работе [2] описан сенсор на основе наностержней MoO_3 для обнаружения диоксида азота NO_2 при температуре 290 °C, проявляющий отклик к данному газу, равный 105. Проведенные авторами работы [3] расчеты из первых принципов показали возможность использования MoO_3 для обнаружения водорода при комнатной температуре. Также показана эффективность различных гибридных материалов на основе оксида молибдена, например пористый кремний – MoO_3 [4], гетероструктуры Fe_2O_3-MoO_3 [5], MoO_3 – восстановленный оксид графена [6]. Несмотря на описанные в литературе результаты, газочувствительные свойства наноструктурированного MoO_3 по сравнению с другими оксидными наноматериалами исследованы меньше. Анализ литературных источников показал, что большинство описанных датчиков на основе MoO_3 работает при высоких температурах. Актуальной задачей является разработка газочувствительных слоев, способных детектировать восстанавливающие газы при температурах менее 200 °C.

Цель настоящей работы – разработка газочувствительных слоев MoO_3 и исследование их сенсорных свойств к парам изопропилового спирта.

Эксперимент. Наночастицы MoO_3 получены гидротермальным методом. Для этого был приготовлен водный раствор, содержащий дигидрат молибдата натрия $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, тиомочевину $SC(NH_2)_2$ и щавелевую кислоту $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$. Автоклав с полученным раствором выдерживали в течение 14 ч при температуре 200 °C. По окончании синтеза продукты реакции охлаждали до комнатной температуры, промывали дистиллированной водой до нейтрального pH и сушили на воздухе. Для создания газочувствительных слоев использовали платформы с электродами встречно-штыревой конфигурации. Полученные наночастицы оксида молибдена диспергировали в изопропиловом спирте. Приготовленной суспензией покрывали поверхность сенсорной платформы с помощью метода spin-coating. Газочувствительные слои высушивали и подвергали термической обработке в течение 2 ч при температуре 400 °C.

Элементный состав поверхности образца анализировали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре K-Alpha (Thermo Scientific, США). Эксперименты проводили с использованием излучения Al-*K*α (энергия фотонов равна 1486,6 эВ). Газочувствительные свойства (отклик, время отклика и восстановления) полученного образца исследовали при воздействии паров изопропилового спирта и варьировании рабочей температуры (150, 200 и 250 °C). Концентрация C_3H_7OH равна 1000 ppm. Разработанный стенд содержит камеру, в которую помещается образец и подается целевой газообразный аналит заданной концентрации. Сопротивление образца регистрируется при циклической подаче в камеру воздуха и целевого газа. Значение сенсорного отклика рассчитывали как отношение сопротивления слоя в атмосфере воздуха к соответствующему значению при наличиии целевого газа. Время отклика оценивали как временной интервал, в течение которого изменение сопротивления достигало 90 % от итогового значения при подаче целевого газа, а время восстановления – как временной интервал, в течение которого сопротивление достигало 90 % от своего первоначального значения на воздухе.

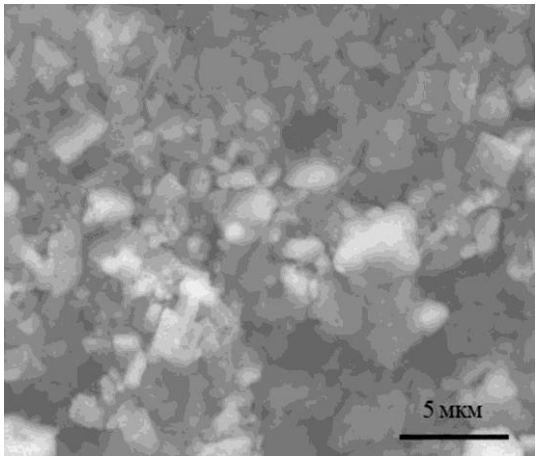


Рис. 1. РЭМ-изображение слоя MoO_3
Fig. 1. SEM image of MoO_3 layer

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены результаты исследования морфологии поверхности газочувствительного слоя на основе MoO_3. Анализ топологии образца с помощью растровой электронной микроскопии подтверждает наличие в нем нанолистов с размерами 0,5–2 мкм и толщиной 100–500 нм, формирующих пластинчатую структуру, а также более крупных агломератов, предположительно образующихся в результате отжига.

На рис. 2, *а* представлены результаты исследования состава поверхности слоя MoO_3 методом РФЭС. На РФЭС-спектре наблюдаются пики, соответствующие молибдену, кислороду и адсорбированному на поверхности углероду. Анализ методом РФЭС позволяет определить особенности химической связи и окружение поверхностных атомов. Так как электроотрицательность кислорода выше, чем молибдена, образование химической связи между их атомами приводит к увеличению энергии связи электронов на уровне Mo 3*d*. В химических соединениях с кислородом молибден может иметь степени окисления от 2+ до 6+. Увеличение степени окисления приводит к росту энергии связи электронов в атомах молибдена. Спектры остовных уровней молибдена и кислорода (Mo 3*d* и O 1*s*) исследовали для определения химического состояния этих элементов.

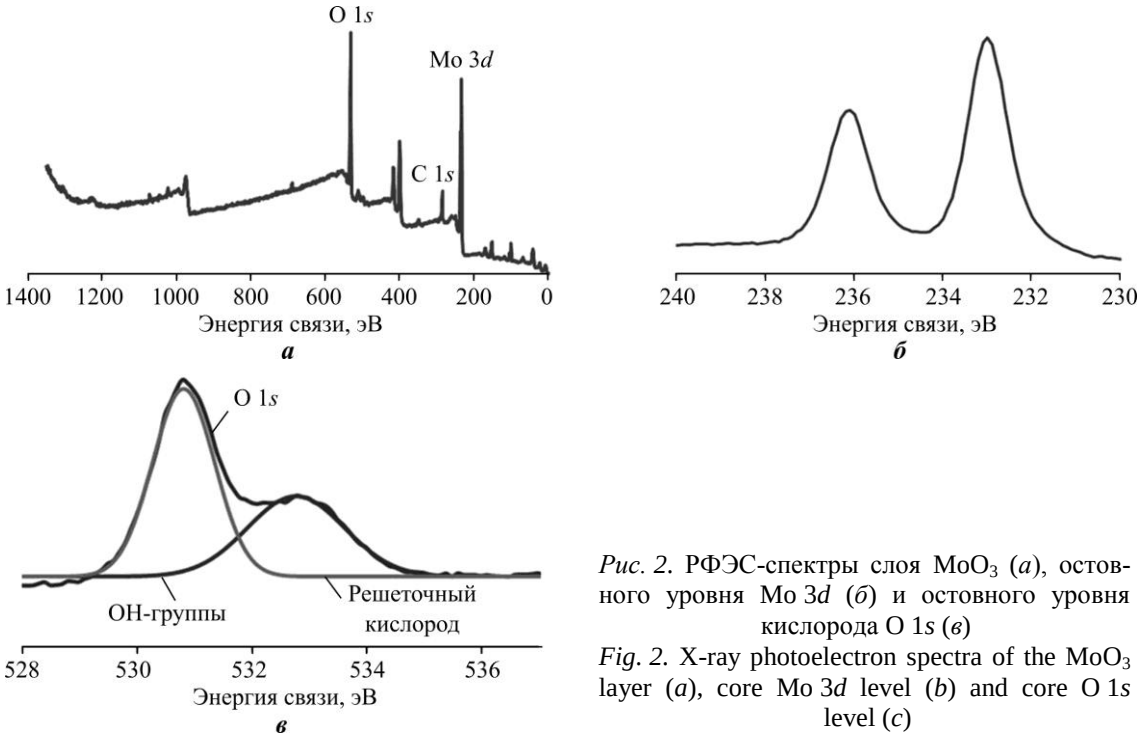


Рис. 2. РФЭС-спектры слоя MoO_3 (*а*), остовного уровня Mo 3*d* (*б*) и остовного уровня кислорода O 1*s* (*в*)
Fig. 2. X-ray photoelectron spectra of the MoO_3 layer (*a*), core Mo 3*d* level (*b*) and core O 1*s* level (*c*)

На рис. 2, *б* представлены результаты исследования уровня Mo 3*d*. Из-за влияния спин-орбитального расщепления РФЭС-спектр содержит два пика с энергиями связи 233 эВ (подуровень Mo $3d_{5/2}$) и 236,1 эВ (подуровень Mo $3d_{3/2}$). Полученные значения энергий связи свидетельствуют о полном окислении молибдена до MoO_3 со степенью окисления Mo^{6+} [7]. Таким образом, энергии связи пиков Mo $3d_{5/2}$ и Mo $3d_{3/2}$ различаются на 3,1 эВ, что также указывает на степень окисления молибдена 6+ [8].

Результаты исследования остовного уровня кислорода O 1*s* приведены на рис. 2, *в*. На РФЭС-спектре наблюдаются две составляющие при энергиях связи, равных 530,8 и 532,8 эВ. Пик с энергией связи 530,8 эВ свидетельствует о наличии на поверхности образца кислорода кристаллической решетки оксида молибдена (O^{2-}) [9]. Пик с энергией связи 532,8 эВ отвечает кислороду, входящему в состав ОН-групп, а также может свидетельствовать о наличии кислородных вакансий.

Сопротивление образца, полученного при описанных условиях синтеза, за исключением этапа отжига, не изменяется при появлении в атмосфере паров изопропилового спирта при комнатной температуре. После отжига образца при комнатной температуре отклик не появился. Поэтому измерения отожженного образца проводили при повышенных температурах. Измерения сенсорного отклика отожженного газочувствительного слоя к парам изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm при различных рабочих температурах показали, что отклик при температуре 150 °C составляет 5,5. С ростом рабочей температуры до 200 °C отклик остается почти неизменным (5,7). Дальнейший рост температуры до 250 °C приводит к резкому увеличению отклика до 13,3. Проанализировано влияние рабочей температуры на быстродействие разработанного газочувствительного слоя. Максимальное время отклика наблюдается при температуре 250 °C и составляет 330 с, а самый быстрый отклик к парам изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm проявляется при температуре 200 °C и составляет 120 с. Рабочая температура почти не влияет на время восстановления. При температурах 250 и 200 °C время восстановления составляет 500 с, при 150 °C – 470 с.

Таким образом, установлено, что разработанный газочувствительный слой на основе MoO_3 имеет высокий сенсорный отклик при температуре 150 °C. При этом наиболее быстрый отклик достигается при температуре 200 °C. На рис. 3 показана временная зависимость изменения сопротивления при подаче паров изопропилового спирта и воздуха. Для температуры 200 °C проанализирована зависимость сенсорного отклика от концентрации паров изопропилового спирта. Полученные результаты иллюстрирует рис. 4, на котором представлена зависимость, близкая к линейной.

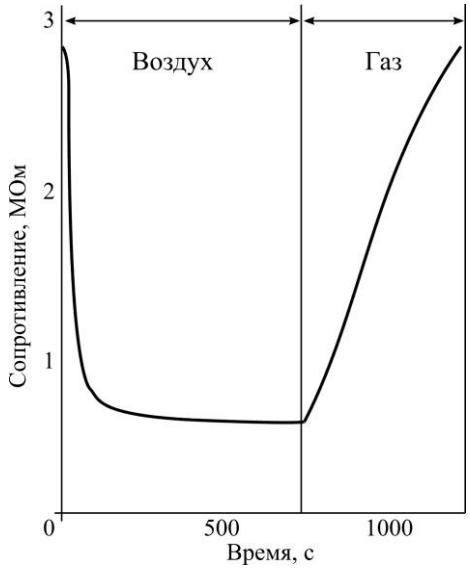


Рис. 3. Динамическая характеристика изменения сопротивления газочувствительного слоя при изменении состава атмосферы
Fig. 3. Dynamic characteristics of the change in the resistance of the gas-sensitive layer when the composition of the atmosphere changes

Газочувствительность традиционных датчиков определяется взаимодействием сенсибилизирующего газа, как правило O_2, и детектируемого газа. При этом газочувствительностью будут обладать датчики с характерными размерами, соизмеримыми с де-

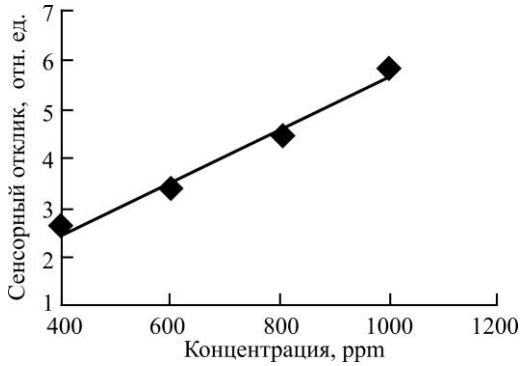


Рис. 4. Зависимость сенсорного отклика образца от концентрации паров изопропилового спирта при температуре 200 °С
Fig. 4. Dependence of the sensor response of the sample on the vapor concentration of isopropyl alcohol at temperature 200 °C

баевской длиной экранирования. В то же время большой интерес представляют датчики, основанные на других механизмах, в частности фрактально-перколяционном протекании. В таких датчиках на сенсорный отклик влияют зерна больших размеров, порядка микрометров, а газочувствительность определяется точками контакта зерен (агрегатов). Подробно данный эффект рассмотрен в работе [10] и может быть пояснен с использованием идеализированной картины фрактала Мандельброта – Гивена. В таких датчиках большая часть поверхности не участвует в процессе изменения транспорта носителей заряда при детектировании. Для изучения природы эффектов чувствительности таких датчиков наиболее информативен метод РФЭС, позволяющий по изменению формы спектра оценить процессы, происходящие на поверхности контактирующих зерен.

Заключение. Сравнение полученных результатов с результатами других авторов по исследованию свойств датчиков на основе MoO_3 показало, что большинство известных датчиков для детектирования восстанавливающих газов работает при температурах выше 250 °С [1, 2]. Достигнутое в настоящей работе значение отклика к парам изопропилового спирта уже при температуре 150 °С не уступает известным результатам. При этом более низкая рабочая температура обеспечивает меньшее энергопотребление, а также лучшую долговременную стабильность из-за меньшего эффекта деградации структуры при длительном нахождении материала при повышенной температуре.

Практический интерес представляют дальнейшие исследования, направленные на снижение рабочей температуры и улучшение сенсорных характеристик.

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. Construction of three-dimensional flower-like α-MoO_3 with hierarchical structure for highly selective triethylamine sensor / ***L.-L. Sui, Y.-M. Xu, X.-F. Zhang et al.*** // Sensors and Actuators B. 2015. Vol. 208. P. 406–414. https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.138

2. Ultrasonic synthesis of MoO_3 nanorods and their gas sensing properties / ***S. Bai, S. Chen, L. Chen et al.*** // Sensors and Actuators B. 2012. Vol. 174. P. 51–58. https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.08.015

3. ***Xu K., Liao N., Xue W., Zhou H.*** First principles investigation on MoO_3 as room temperature and high temperature hydrogen gas sensor // Int. J. Hydrog. Energy. 2020. Vol. 45. Iss. 15. P. 9252–9259. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.065

4. Porous silicon/α-MoO_3 nanohybrid based fast and highly sensitive CO_2 gas sensors / ***T. Thomas, Y. Kumar, J. A. R. Ramón et al.*** // Vacuum. Vol. 184. Art. ID: 109983. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109983

5. A fast response ppb-level aniline gas sensor based on hierarchical hollow spheres of α-Fe_2O_3/α-MoO_3 heterostructure / ***L. Sui, W. Zhang, P. Wang et al.*** // Sensors and Actuators B. 2021. Vol. 346. Art. ID: 130519. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130519

6. Synthesis of MoO_3/reduced graphene oxide hybrids and mechanism of enhancing H_2S sensing performances / ***S. Bai, C. Chen, R. Luo et al.*** // Sensors and Actuators B. 2015. Vol. 216. P. 113–120. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.036

7. Low temperature synthesis of MoS_2 and MoO_3: MoS_2 hybrid thin films via the use of an original hybrid sulfidation technique / ***H. Ftouhi, H. Lamkaouane, G. Louarn et al.*** // Surf. Interfaces. 2022. Vol. 32. Art. ID: 102120. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102120

8. Synthesis of β-Mo_2C thin films / ***C. A. Wolden, A. Pickerell, T. Gawai et al.*** // Appl. Mater. Interfaces. 2011. Vol. 3. Iss. 2. P. 517–521. https://doi.org/10.1021/am101095h

9. Synthesis and characterization of an α-MoO_3 nanobelt catalyst and its application in one-step conversion of fructose to 2,5-diformylfuran / ***Z. Yang, B. Zhu, Y. He et al.*** // New J. Chem. 2021. Vol. 45. Iss. 36. P. 16482–16489. https://doi.org/10.1039/D1NJ02679H

10. ***Мошников В. А., Налимова С. С., Селезнев Б. И.*** Газочувствительные слои на основе фрактально-перколяционных структур // ФТП. 2014. Т. 48. № 11. С. 1535–1539. EDN: SNVWUZ.

Статья поступила в редакцию 02.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.07.2023 г.;
принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

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

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

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. Sui L.-L., Xu Y.-M., Zhang X.-F., Cheng X.-L., Gao S., Zhao H., Cai Z., Huo L.-H. Construction of three-dimensional flower-like α-MoO_3 with hierarchical structure for highly selective triethylamine sensor. *Sensors and Actuators B,* 2015, vol. 208, pp. 406–414. https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.138

2. Bai S., Chen S., Chen L., Zhang K., Luo R., Li D., Liu C. C. Ultrasonic synthesis of MoO_3 nanorods and their gas sensing properties. *Sensors and Actuators B,* 2012, vol. 174, pp. 51–58. https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.08.015

3. Xu K., Liao N., Xue W., Zhou H. First principles investigation on MoO_3 as room temperature and high temperature hydrogen gas sensor. *Int. J. Hydrog. Energy,* 2020, vol. 45, iss. 15, pp. 9252–9259. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.065

4. Thomas T., Kumar Y., Ramón J. A. R., Agarwal V., Guzmán S. S., Reshmi R., Pushpan S., Loredo S. L., Sanal K. C. Porous silicon/α-MoO_3 nanohybrid based fast and highly sensitive CO_2 gas sensors. *Vacuum,* vol. 184, art. ID: 109983. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109983

5. Sui L., Zhang W., Wang P., Zhao B., Wu H., Zhao D., Dong G., Yu H., Xu Y., Huo L. A fast response ppb-level aniline gas sensor based on hierarchical hollow spheres of α-Fe_2O_3/α-MoO_3 heterostructure. *Sensors and Actuators B,* 2021, vol. 346, art. ID: 130519. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130519

6. Bai S., Chen C., Luo R., Chen A., Li D. Synthesis of MoO_3/reduced graphene oxide hybrids and mechanism of enhancing H_2S sensing performances. *Sensors and Actuators B,* 2015, vol. 216, pp. 113–120. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.036

7. Ftouhi H., Lamkaouane H., Louarn G., Diani M., Bernède J.-C., Addou M., Cattin L. Low temperature synthesis of MoS_2 and MoO_3: MoS_2 hybrid thin films via the use of an original hybrid sulfidation technique. *Surf. Interfaces,* 2022, vol. 32, art. ID: 102120. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102120

8. Wolden C. A., Pickerell A., Gawai T., Parks S., Hensley J., Way J. D. Synthesis of β-Mo_2C thin films. *Appl. Mater. Interfaces*, 2011, vol. 3, iss. 2, pp. 517–521. https://doi.org/10.1021/am101095h

9. Yang Z., Zhu B., He Y., Zhang G., Cui P., He J. Synthesis and characterization of an α-MoO_3 nanobelt catalyst and its application in one-step conversion of fructose to 2,5-diformylfuran. *New J. Chem.*, 2021, vol. 45, iss. 36, pp. 16482–16489. https://doi.org/10.1039/D1NJ02679H

10. Moshnikov V. A., Nalimova S. S., Seleznev B. I. Gas-sensitive layers based on fractal-percolation structures. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, iss. 11, pp. 1499–1503. https://doi.org/10.1134/S1063782614110177

The article was submitted 02.05.2023; approved after reviewing 27.07.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

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

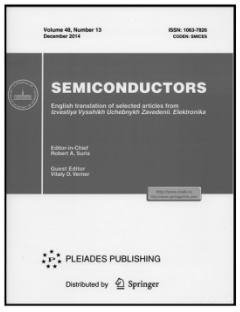
Zamir V. Shomakhov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), shozamir@yandex.ru

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

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал

SEMICONDUCTORS



Vol. 57, *No.* 1, 2023. – ISSN PRINT: 1063-7826,
ISSN ONLINE: 1090-6479,

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

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

Научная статья
УДК 537.323
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-147-157
EDN: SERUSN

Исследование концентрации и подвижности носителей заряда в наноструктурированных термоэлектрических материалах на основе PbTe и GeTe

Д. В. Пепеляев, Е. П. Корчагин, М. Ю. Штерн, М. С. Рогачёв, Д. Ю. Терехов, С. Б. Бурзин, Ю. И. Штерн, А. А. Шерченков

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

pepelyaev-dima@mail.ru

Аннотация. Перспективным направлением повышения термоэлектрической добротности *ZT* является разработка наноструктурированных термоэлектрических материалов (ТЭМ), в том числе на основе теллурида свинца PbTe и теллурида германия GeTe. Для оптимизации технологии наноструктурирования важно знать механизмы тепло- и электропереноса в ТЭМ, зависящие от концентрации и подвижности носителей заряда. В работе для формирования наноструктурированных среднетемпературных ТЭМ на основе PbTe *n*-типа и GeTe *p*-типа использована разработанная технология, включающая синтез прямым сплавлением компонентов, измельчение синтезированных PbTe и GeTe в планетарной шаровой мельнице до нанодисперсных порошков и их консолидацию в объемный материал искровым плазменным спеканием. Омические контакты на образцах ТЭМ для проведения электрофизических измерений сформированы электрохимическим осаждением никеля. Исследованы температурные зависимости термоэлектрических параметров наноструктурированных ТЭМ. Для измерения концентрации и подвижности основных носителей использован метод Ван дер Пау. Установлено, что значения концентраций основных носителей заряда ТЭМ, полученных горячим прессованием и искровым плазменным спеканием, находятся в диапазоне 10^{19}–10^{20} см$^{-3}$, что является оптимальным для ТЭМ. Выявлено, что подвижность основных носителей для PbTe значительно выше, чем для GeTe. При этом подвижность основных носителей в наноструктурированном PbTe уменьшилась на 36 % по сравнению с PbTe-HP. Однако это не привело к заметному уменьшению электропроводности, что обусловлено повышением концентрации основных носителей. В результате для наноструктурированных PbTe и GeTe достигнуты максимальные значения параметра *ZT* соответственно на 14 и 13 % выше, чем для ТЭМ, сформированных горячим прессованием.

Ключевые слова: термоэлектричество, термоэлектрический генератор, наноструктурированные термоэлектрические материалы, термоэлектрические параметры, метод Ван дер Пау, электропроводность, постоянная Холла, концентрация и подвижность носителей заряда

© Д. В. Пепеляев, Е. П. Корчагин, М. Ю. Штерн, М. С. Рогачёв, Д. Ю. Терехов, С. Б. Бурзин, Ю. И. Штерн, А. А. Шерченков, 2024

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-19-00494 – синтез материалов, проект № 21-19-00312 – формирование образцов и их характеризация).

Для цитирования: Исследование концентрации и подвижности носителей заряда в наноструктурированных термоэлектрических материалах на основе PbTe и GeTe / Д. В. Пепеляев, Е. П. Корчагин, М. Ю. Штерн и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 147–157. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-147-157. – EDN: SERUSN.

Original article

Investigation of the concentration and mobility of charge carriers in nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe and GeTe

D. V. Pepelyaev, E. P. Korchagin, M. Yu. Shtern, M. S. Rogachev, D. Yu. Terekhov, S. B. Bursin, Yu. I. Shtern, A. A. Sherchenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

pepelyaev-dima@mail.ru

Abstract. A promising approach for increasing the thermoelectric figure of merit *ZT* is the development of nanostructured thermoelectric (TE) materials including those on the basis of lead telluride PbTe and germanium telluride GeTe. Nanopatterning technology optimization requires knowledge of heat- and electrotransfer mechanisms in TE materials that depend on concentration and mobility of charge carriers. In this work, nanostructured middle-temperature TE materials on the basis of *n*-type PbTe and *p*-type GeTe were prepared using the developed technology including synthesis by direct alloying of components, grinding of synthesized PbTe and GeTe in a planetary ball mill to nanopowders, and their consolidation into a bulk material by spark plasma sintering. For electrophysical measurements the ohmic contacts on the samples of TE materials were formed by electrochemical deposition of nickel. The temperature dependences of the thermoelectric parameters for nanostructured TE materials were investigated. The van der Pauw method was used for the measurements of the concentration and mobility of majority carriers. It has been established that the values of concentrations of the majority charge carriers for the TE materials obtained by hot pressing and spark plasma sintering are in the range from 10^{19} to 10^{20} cm^{-3}, which is optimal for TE materials. It was found that the mobility of the majority charge carriers for PbTe is significantly higher than for GeTe. At the same time, the mobility of the majority charge carriers in nanostructured PbTe has decreased by 36 % in comparison with PbTe obtained by hot pressing. However, this has not led to appreciable decrease in electrical conductivity, which is due to the increase in concentration of the majority charge career. As a result, the maximum obtained values of *ZT* for nanostructured PbTe and GeTe are respectively 14 and 13 % higher than for TE materials prepared by hot pressing.

Keywords: thermoelectricity, thermoelectric generator, TEG, nanostructured thermoelectric materials, thermoelectric parameters, Van der Pauw method, electrical conductivity, Hall constant, carriers concentration, carriers mobility

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 20-19-00494 – synthesis of materials, project no. 21-19-00312 –formation of samples and their characterization).

For citation: Pepelyaev D. V., Korchagin E. P., Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Terekhov D. Yu., Bursin S. B., Shtern Yu. I., Sherchenkov A. A. Investigation of the concentration and mobility of charge carriers in nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe and GeTe. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 147–157. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-147-157. – EDN: SERUSN.

Введение. Твердотельные термоэлектрические устройства – перспективные альтернативные источники энергии [1]. Они обеспечивают прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и наоборот, могут использоваться для охлаждения и регулирования температуры. Твердотельные термоэлектрические устройства имеют ряд преимуществ: экологичность работы, простота конструкции, отсутствие движущихся частей, небольшая масса, произвольная ориентация в пространстве, высокая надежность, длительная работа без обслуживания, высокая удельная мощность [2]. Температура источников «бросового» тепла, таких как промышленные предприятия, двигатели внутреннего сгорания и других, как правило, находится в диапазоне 500–800 К [3]. В этом температурном диапазоне могут применяться среднетемпературные термоэлектрические материалы (ТЭМ) с рабочим диапазоном 450–900 К, например на основе теллурида свинца PbTe и теллурида германия GeTe.

Однако низкая эффективность твердотельных термоэлектрических устройств ограничивает их использование специальными областями применения, где надежность и высокий ресурс работы имеют основополагающее значение. Эффективность подобных устройств определяется безразмерной термоэлектрической добротностью ТЭМ: $ZT = S^2\sigma T/\kappa$, где S – термоЭДС; σ – электропроводность; T – абсолютная температура; κ – теплопроводность материала. Одним из перспективных направлений увеличения ZT, развиваемых в настоящее время, является разработка наноструктурированных ТЭМ, в том числе на основе PbTe и GeTe [3, 4]. В таких материалах происходит повышение термоэлектрической добротности ZT за счет снижения теплопроводности в результате рассеяния фононов в широком диапазоне длин волн на наноразмерных элементах структуры [5]. При этом может наблюдаться и рассеяние носителей заряда, что сопровождается уменьшением электропроводности и затрудняет достижение высоких значений ZT. Для оптимизации технологии наноструктурирования важно знать механизмы тепло- и электропереноса в ТЭМ, которые зависят от концентрации и подвижности носителей заряда.

В настоящей работе исследуются концентрация и подвижность носителей заряда в среднетемпературных наноструктурированных ТЭМ на основе PbTe *n*-типа и GeTe *p*-типа.

Методика эксперимента. Для получения наноструктурированных материалов использовали разработанную технологию. На первой стадии проводили синтез PbTe *n*-типа (легированного 0,2 вес. % PbI_2 и 0,3 вес. % Ni) и GeTe *p*-типа ($Ge_{0,96}Bi_{0,04}Te$) методом прямого сплавления взятых в стехиометрическом соотношении компонентов при температурах 1320 и 1240 К соответственно. В качестве исходных компонентов использовали Pb, Te и Ge чистотой 99,99; 99,999 и 99,999 масс. % соответственно. После завершения синтеза ампулы с ТЭМ подвергали закаливанию со скоростью охлаждения порядка 500 К/мин, что необходимо для предотвращения расслоения жидкой фазы на разные по составу зоны из-за существенного различия исходных компонентов по плотности. На второй стадии для формирования структуры использовали метод горяче-

го прессования синтезированного материала, который измельчали с помощью дробилки ЩД 6 и мельницы ножевого типа IKA A11. Горячее прессование проводили на прессе ИП-2500М-авто при давлении 7 т/см^2 и температуре 690 К. Полученные горячим прессованием образцы ТЭМ проходили стабилизационный отжиг при температуре 770 К в течение 48 ч в атмосфере аргона.

Для изготовления наноструктурированных ТЭМ получали нанодисперсный порошок PbTe и GeTe. Для этого ТЭМ на основе PbTe и GeTe, синтезированные прямым сплавлением компонентов, измельчали с помощью дробилки ЩД 6, затем мельницы ножевого типа IKA A11 в перчаточном боксе Plas-Labs в защитной атмосфере из аргоно-водородной смеси (97 % Ar и 3 % H_2). Измельчение проводили до размера частиц 500 мкм. Полученный порошок дополнительно измельчали с помощью планетарной шаровой мельницы Retsch PM400 MA. Время измельчения составляло 20, 40 и 60 мин. Время помола выбирали с целью получения порошков с минимальной дисперсностью. При увеличении длительности более 60 мин интенсифицируется процесс объединения частиц порошка в агломераты, также наблюдается эффект наклепа частиц. Объемные образцы наноструктурированных ТЭМ получали методом искрового плазменного спекания (ИПС) на установке SPS-511S при следующих режимах. Для PbTe: давление 80 МПа, температура спекания 723 К, время спекания 5 мин. Для GeTe: давление 50 МПа, температура спекания 773 К, время спекания 5 мин. Измерение плотности полученных ТЭМ показало, что для объемного наноструктурированного PbTe она находится в диапазоне 95–98 %, а для GeTe – в диапазоне 98–99 % от теоретических значений плотности. Таким образом, отработанный режим консолидации порошков с помощью метода ИПС позволил получить высокую плотность объемных наноструктурированных ТЭМ.

В табл. 1 представлены результаты исследования с помощью рентгеновской дифрактометрии структуры образцов объемных наноструктурированных PbTe и GeTe, полученных после компактирования нанодисперсных порошков синтезированных ТЭМ. Порошки получали разной дисперсности измельчением ТЭМ в планетарной шаровой мельнице в течение 20, 40 и 60 мин. Установлено, что в процессе ИПС размеры зерен в наноструктурированном ТЭМ увеличиваются в среднем в три раза относительно дисперсности исходного порошка.

Таблица 1

Средние размеры элементов кристаллической структуры в наноструктурированных PbTe и GeTe, нм

Table 1

Average sizes of crystal structure elements in nanostructured PbTe and GeTe, nm

PbTe			GeTe		
Время измельчения, мин					
20	40	60	20	40	60
180 ± 10	145 ± 10	116 ± 10	190 ± 10	120 ± 10	85 ± 10

Для исследования температурных зависимостей электропроводности, термоЭДС и теплопроводности в интервале температур 300–900 К использовали разработанные методику и аппаратно-программный измерительный комплекс [6]. Исследование термоэлектрических параметров проводили в стационарном режиме в едином измерительном

цикле, теплопроводность определяли абсолютным методом. Погрешности измерений составляли: электропроводности и термоЭДС – 3 %; теплопроводности – 5 %.

Омические контакты на ТЭМ для проведения электрофизических измерений формировали электрохимическим осаждением слоя никеля [7]. Состав электролита и условия электрохимического осаждения слоя никеля следующие:

Концентрация $NiSO_4 \times 7H_2O$ ..... 250 г/л
Концентрация NaCl ..... 12 г/л
Концентрация H_3BO_3 ..... 39 г/л
Температура ..... 25–30 °C
Плотность тока ..... 1,0–1,5 А/дм^2
Время ..... 5 мин
Толщина ..... 1,0–2,0 мкм

Требуемую конфигурацию контактов на исследуемых образцах получали путем использования обратной (взрывной) фотолитографии с применением разработанного стенда для проведения экспонирования рисунка на фоторезист без изготовления фотошаблона [8]. Для нанесения олова на поверхность сформированных никелевых контактов использовали флюс, состоящий из 97 г глицерина и 3 г NH_4Cl. Подвижность и концентрацию основных носителей заряда оценивали по результатам измерения электропроводности и постоянной Холла с использованием метода Ван дер Пау на установке HMS-5000 (Ecopia).

Для определения постоянной Холла R_H собственного полупроводника применяли выражение [9]

$$R_H = \frac{A}{e}\frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_n n + \mu_p p)^2},$$

где A – коэффициент, который определяется преобладающими механизмами рассеяния носителей заряда, одинаковыми для электронов и дырок; e – модуль заряда электрона; μ_n и μ_p – дрейфовые подвижности электронов и дырок соответственно; n и p – концентрации электронов и дырок соответственно.

Для вырожденных полупроводников, к которым относятся ТЭМ, коэффициент $A = 1$. В результате для полупроводников n- и p-типов имеем соответственно

$$R_H = -\frac{1}{en}, \quad R_H = \frac{1}{ep}. \tag{1}$$

Таким образом, постоянная Холла обратно пропорциональна концентрации носителей заряда, а ее знак совпадает со знаком носителей заряда.

С учетом уравнений электропроводности полупроводников n- и p-типов ($\sigma = en\mu_n$ и $\sigma = ep\mu_p$ соответственно) рассчитывали подвижности носителей:

$$\mu_n = -R_H\sigma, \quad \mu_p = R_H\sigma. \tag{2}$$

Формулы (1) дают возможность определить концентрацию электронов n или дырок p, если экспериментально определена постоянная Холла. Кроме того, если экспериментально определена электропроводность полупроводника, то можно установить и подвижности носителей заряда согласно формулам (2). Схемы измерения электропроводности и постоянной Холла ТЭМ представлены на рис. 1.

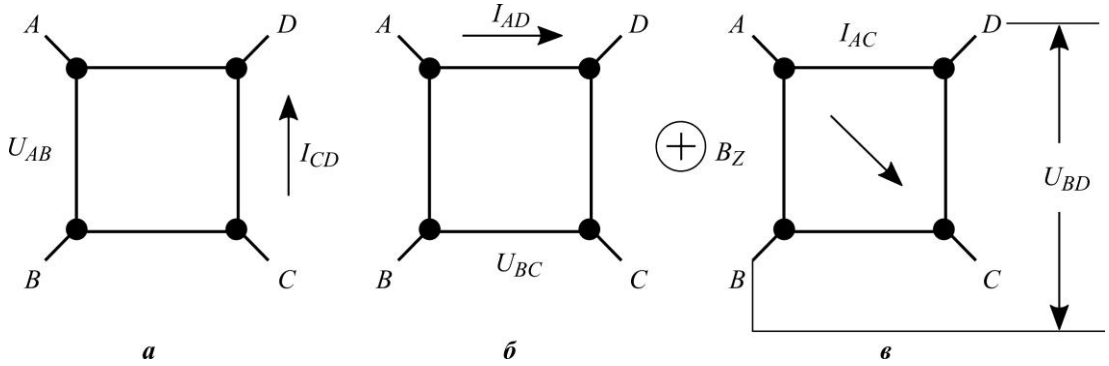


Рис. 1. Схемы измерения электропроводности и показателя Холла методом Ван дер Пау: *а* – R_{CDAB}; *б* – R_{ADBC}; *в* – ΔR_{ACBD} в магнитном поле

Fig. 1. Schemes for measuring the electrical conductivity and the Hall index by the van der Pauw method: *a* – R_{CDAB}; *b* – R_{ADBC}; *c* – ΔR_{ACBD} in a magnetic field

Измерения исследуемых ТЭМ проводили при температуре 300 К, магнитном поле 0,55 Тл и токе 10 мА. Для исследований изготавливали образцы с размерами 10 × 10 × 1 мм. Удельное сопротивление рассчитывали по формуле [9]

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{ADBC} + R_{CDAB}}{2} f\left(\frac{R_{ADBC}}{R_{CDAB}}\right),$$

где d – толщина образца; $R_{ADBC} = U_{BC}/I_{AD}$; $R_{CDAB} = U_{AB}/I_{CD}$; $f(R_{ADBC}/R_{CDAB})$ – функция поправок, зависящая только от соотношения R_{ADBC}/R_{CDAB}. Если $R_{ADBC} \approx R_{CDAB}$, то $f(R_{ADBC}/R_{CDAB}) = 1$.

Показатель Холла рассчитывали по следующему уравнению:

$$R_H = \frac{U_{AC}(B_Z) - U_{AC}(-B_Z) + U_{BD}(B_Z) - U_{BD}(-B_Z)}{4IB} d,$$

где $U_{AC}(B_Z)$, $U_{AC}(-B_Z)$, $U_{BD}(B_Z)$, $U_{BD}(-B_Z)$ – значения напряжений между контактами *A* и *C*, а также *B* и *D* при двух включенных в противоположных направлениях магнитных полях B_Z и $-B_Z$ (см. рис. 1, *в*).

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены результаты измерения температурных зависимостей электропроводности наноструктурированных PbTe и GeTe. Образцы PbTe-HP, GeTe-HP получены горячим прессованием (ГП), образцы PbTe-20, PbTe-40, PbTe-60 и GeTe-20, GeTe-40, GeTe-60 получены из порошков с временем помола 20, 40 и 60 мин соответственно. Установленные данные сопоставлены со значениями соответствующих параметров для изученных ранее ТЭМ тех же составов, полученных ГП [10]. Из рис. 2 видно, что для всех исследованных ТЭМ с ростом температуры наблюдается снижение электропроводности с выходом на насыщение. Для материалов, полученных ГП, значение электропроводности выше, чем для наноструктурированных ТЭМ. Однако эта разница составляет менее 80 $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$ (не превышает 3 %). Наибольшее различие наблюдается для материала на основе PbTe. Температурные зависимости электропроводности можно объяснить тем, что механизм электропереноса в ТЭМ определяется их интерметаллической природой [11, 12]. С ростом температуры в интервале 300–800 К концентрация основных носителей практически не изменяется и электропроводность уменьшается за счет рассеяния носителей заряда на колебаниях решетки. Повышение вклада неосновных носителей в конце интервала рабочих температур обусловливает стабилизацию электропроводности и тенденцию к ее повышению.

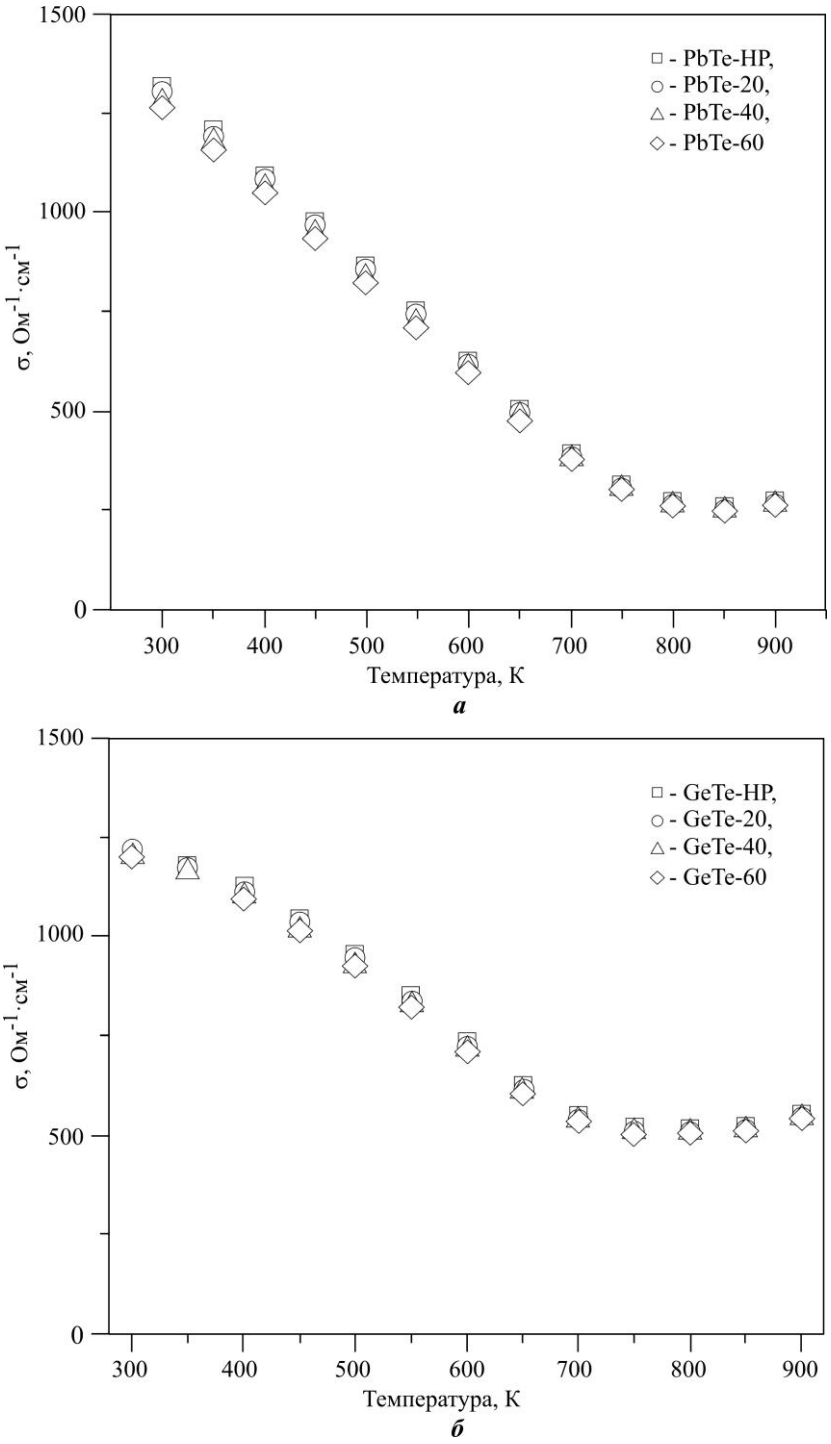


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности PbTe (*а*) и GeTe (*б*)
Fig. 2. Temperature dependences of electrical conductivity of PbTe (*a*) and GeTe (*b*)

В связи со слабым влиянием времени помола синтезированных материалов в диапазоне 20–60 мин на электропроводность полученных наноструктурированных ТЭМ измерение показателя Холла методом Ван дер Пау проводили только для образцов PbTe-60 и GeTe-60, а также для PbTe-HP и GeTe-HP. Результаты измерений при температуре 300 К показателя Холла и электропроводности, а также расчета подвижности и концентрации основных носителей заряда ТЭМ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения измеренных и рассчитанных параметров наноструктурированных материалов, полученных разными методами

Table 2

Values of measured and calculated parameters of nanostructured materials obtained by different methods

Материал	Электро-проводность σ, $Ом^{-1}·см^{-1}$		Показатель Холла R_H, $см^3·Кл^{-1}$		Подвижность μ, $см^2·В^{-1}·с^{-1}$		Концентрация, $см^{-3}$	
	ИПС	ГП	ИПС	ГП	ИПС	ГП	ИПС	ГП
PbTe (*n*-тип)	1273	1313	–0,10	–0,15	128,81	201,12	$6{,}25·10^{19}$	$4{,}07·10^{19}$
GeTe (*p* -тип)	1202	1203	0,06	0,06	68,73	70,06	$1{,}09·10^{20}$	$1{,}04·10^{20}$

Отметим, что значения электропроводности, измеренные при комнатной температуре методом Ван дер Пау, совпадают в пределах погрешности измерений с экспериментальными результатами, полученными по методике, описанной в работе [6].

Для материалов на основе PbTe, полученных методами ГП и ИПС, показатель Холла отрицательный, что свидетельствует об электронном типе проводимости, а также подтверждается результатами измерения термоЭДС [12]. Для GeTe показатель Холла положительный, что говорит о дырочном типе проводимости, и так же соответствует результатам измерения термоЭДС. Значения концентрации основных носителей заряда ТЭМ, полученных методами ГП и ИПС, находятся в диапазоне 10^{19}–10^{20} $см^{-3}$, что является оптимальным для ТЭМ [12]. Подвижность основных носителей заряда для PbTe значительно выше, чем для GeTe. При этом подвижность основных носителей заряда в наноструктурированном PbTe уменьшилась на 36 % по сравнению с PbTe-HP. Однако это не привело к заметному уменьшению электропроводности, что обусловлено повышением концентрации основных носителей заряда. Для GeTe, полученных методами ГП и ИПС, значения подвижности и концентрации основных носителей заряда схожи.

Для наноструктурированных образцов, сформированных методом ИПС, наибольшие значения термоэлектрической добротности *ZT* имеют материалы, полученные из порошков с временем помола 60 мин. Для наноструктурированного PbTe-60 максимальное значение параметра *ZT* = 1,34 при температуре 850 К, что на 14 % выше, чем для PbTe-HP. Для наноструктурированного GeTe-60 максимальное значение параметра *ZT* = 1,43 при температуре 840 К, что на 13 % выше, чем для GeTe-HP. Увеличение параметра *ZT* обеспечивается снижением теплопроводности в наноструктурированных ТЭМ за счет рассеяния фононов на наноразмерных элементах структуры [12].

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная технология наноструктурирования среднетемпературных ТЭМ не приводит к существенному уменьшению электропроводности в результате рассеяния носителей на наноразмерных элементах структуры. Это позволяет увеличить термоэлектрическую добротность *ZT* за счет снижения теплопроводности, обусловленного существенным рассеянием фононов на наноразмерных дефектах.

Литература

1. A review on fundamentals, design and optimization to high ZT of thermoelectric materials for application to thermoelectric technology / ***A. Kumar, S. Bano, B. Govind et al.*** // J. Electron. Mater. 2021. Vol. 50. Iss. 11. P. 6037–6059. https://doi.org/10.1007/s11664-021-09153-7

2. A comprehensive review of strategies and approaches for enhancing the performance of thermoelectric module / ***S. Lv, Z. Qian, D. Hu et al.*** // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 12. Art. No. 3142. https://doi.org/10.3390/en13123142

3. Strategies for optimizing the thermoelectricity of PbTe alloys / ***J. Zhai, T. Wang, H. Wang et al.*** // Chinese Phys. B. 2018. Vol. 27. No. 4. Art. ID: 047306. https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/4/047306

4. Термоэлектрические свойства и термическая стабильность наноструктурированных термоэлектрических материалов на основе PbTe, GeTe и SiGe / ***М. Ю. Штерн, А. А. Шерченков, Ю. И. Штерн и др.*** // Российские нанотехнологии. 2021. Т. 16. № 3. С. 399–408. https://doi.org/10.1134/S1992722321030171. – EDN: RWKYQO.

5. ***Khvesyuk V. I., Skryabin A. S.*** Heat conduction in nanostructures // High Temp. 2017. Vol. 55. Iss. 3. P. 434–456. https://doi.org/10.1134/S0018151X17030129

6. ***Shtern M. Yu.*** Development and application of a research technique to study thermal and electrophysical parameters of thermoelectric materials at temperatures up to 1200 K // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2019. P. 1920–1926. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657108

7. Contacts to thermoelectric materials obtained by chemical and electrochemical deposition of Ni and Co / ***E. Korchagin, M. Shtern, I. Petukhov et al.*** // J. Electron. Mater. 2022. Vol. 51. Iss. 10. P. 5744–5758. https://doi.org/10.1007/s11664-022-09860-9

8. Разработка процесса фотолитографии для изготовления гибкого тонкопленочного термоэлектрического генератора / ***Д. Ю. Терехов, Д. В. Пепеляев, А. О. Якубов и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 591–602. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-591-602. – EDN: CACDVA.

9. ***Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В.*** Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

10. ***Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I.*** Development and investigation of the effective thermoelectric materials for the multisectional generator thermoelements // Mater. Today: Proc. 2020. Vol. 20 (3). P. 295–304. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.066

11. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements / ***M. Shtern, M. Rogachev, Yu. Shtern et al.*** // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 877. Art. ID: 160328. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328

12. ***Xiao Y., Zhao L.-D.*** Charge and phonon transport in PbTe-based thermoelectric materials // npj Quant. Mater. 2018. Vol. 3. Art. No. 55. https://doi.org/10.1038/s41535-018-0127-y

Статья поступила в редакцию 07.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 31.07.2023 г.; принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Пепеляев Дмитрий Валерьевич – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pepelyaev-dima@mail.ru

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

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

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

Терехов Дмитрий Юрьевич – младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gsm.ads@yandex.ru

Бурзин Сергей Борисович – старший преподаватель Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sbb48@mail.ru

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

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

References

1. Kumar A., Bano S., Govind B., Bhardwaj A., Bhatt K., Misra D. K. A review on fundamentals, design and optimization to high ZT of thermoelectric materials for application to thermoelectric technology. *J. Electron. Mater.*, 2021, vol. 50, iss. 11, pp. 6037–6059. https://doi.org/10.1007/s11664-021-09153-7

2. Lv S., Qian Z., Hu D., Li X., He W. A comprehensive review of strategies and approaches for enhancing the performance of thermoelectric module. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 12, art. no. 3142. https://doi.org/10.3390/en13123142

3. Zhai J., Wang T., Wang H., Su W., Wang X., Chen T., Wang C. Strategies for optimizing the thermoelectricity of PbTe alloys. *Chinese Phys. B*, 2018, vol. 27, no. 4, art. ID: 047306. https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/4/047306

4. Shtern M. Yu., Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I., Rogachev M. S., Babich A. V. Thermoelectric properties and thermal stability of nanostructured thermoelectric materials on the basis of PbTe, GeTe, and SiGe. *Nanobiotechnol. Russia*, 2021, vol. 16, iss. 3, pp. 363–372. https://doi.org/10.1134/S2635167621030174

5. Khvesyuk V. I., Skryabin A. S. Heat conduction in nanostructures. *High Temp.*, 2017, vol. 55, iss. 3, pp. 434–456. https://doi.org/10.1134/S0018151X17030129

6. Shtern M. Yu. Development and application of a research technique to study thermal and electrophysical parameters of thermoelectric materials at temperatures up to 1200 K. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).* St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2019, pp. 1920–1926. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657108

7. Korchagin E., Shtern M., Petukhov I., Shtern Yu., Rogachev M., Kozlov A., Mustafoev B. Contacts to thermoelectric materials obtained by chemical and electrochemical deposition of Ni and Co. *J. Electron. Mater.*, 2022, vol. 51, iss. 10, pp. 5744–5758. https://doi.org/10.1007/s11664-022-09860-9

8. Terekhov D. Yu., Pepelyaev D. V., Yakubov A. O., Babich A. V., Sherchenkov A. A. Development of the photolithography process for the fabrication of flexible thin film thermoelectric generator. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 591–602. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-591-602. – EDN: CACDVA.

9. Batavin V. V., Kontsevoy Yu. A., Fedorovich Yu. V. *Semiconductor materials and structures parameters measurement.* Moscow, Radio i svyaz', 1985. 264 p. (In Russian).

10. Shtern M. Yu., Rogachev M. S., Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I. Development and investigation of the effective thermoelectric materials for the multisectional generator thermoelements. *Mater. Today: Proc.*, 2020, vol. 20 (3), pp. 295–304. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.066

11. Shtern M., Rogachev M., Shtern Yu., Sherchenkov A., Babich A., Korchagin E., Nikulin D. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 877, art. ID: 160328. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328

12. Xiao Y., Zhao L.-D. Charge and phonon transport in PbTe-based thermoelectric materials. *npj Quant. Mater.*, 2018, vol. 3, art. no. 55. https://doi.org/10.1038/s41535-018-0127-y

The article was submitted 07.07.2023; approved after reviewing 31.07.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Dmitry V. Pepelyaev – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pepelyaev-dima@mail.ru

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

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

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

Dmitry Yu. Terekhov – Junior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gsm.ads@yandex.ru

Sergey B. Burzin – Senior Lecturer of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sbb48@mail.ru

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

Aleksey A. Sherchenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aa_sherchenkov@rambler.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 546.22/.24
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-158-167
EDN: NVNAQJ

Измерительный комплекс для исследования температурных зависимостей электрического сопротивления халькогенидных материалов в твердом и жидком состояниях

П. И. Лазаренко

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

aka.jum@gmail.com

Аннотация. В настоящее время фазопеременные халькогенидные материалы активно применяются для создания энергонезависимой электрической и оптической памяти и различных устройств перестраиваемой фотоники. Принцип перевода халькогенидных материалов из кристаллического в аморфное состояние основан на процессе плавления. Определение параметров фазового перехода кристалл – расплав и связанных с ним процессов, воздействующих на фазопеременный материал, является критически важным с позиции дальнейшего увеличения количества рабочих циклов и оптимизации параметров создаваемых устройств, в том числе энергопотребления. В работе представлены результаты разработки, создания и введения в эксплуатацию аппаратно-программного комплекса по измерению электрического сопротивления халькогенидных материалов во время нагрева. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет проводить измерения температурных зависимостей электрического сопротивления различных полупроводниковых материалов, в том числе в расплавленном состоянии, от комнатной температуры до температуры 800 °C как на воздухе, так и в инертной атмосфере. Проверка работоспособности аппаратно-программного комплекса проведена на селене и теллуре. Результаты измерений показали высокую сходимость с литературными данными и результатами дифференциальной сканирующей калориметрии.

Ключевые слова: фазопеременные материалы, халькогенидные полупроводники, фазовая память, процесс плавления, температура плавления, электрофизические свойства, аппаратно-программный комплекс

Для цитирования: Лазаренко П. И. Измерительный комплекс для исследования температурных зависимостей электрического сопротивления халькогенидных материалов в твердом и жидком состояниях // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 158–167. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-158-167. – EDN: NVNAQJ.

© П. И. Лазаренко, 2024

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-79-10322, https://rscf.ru/project/20-79-10322/) с применением оборудования ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база».

Благодарности: автор статьи выражает благодарность Бабичу А. В., Веретенникову В. В. и Морозову И. С. за техническую помощь при проведении измерений.

Original article

Measuring complex for studying temperature dependence of the electrical resistance of chalcogenide materials in the solid and molten states

P. I. Lazarenko

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

aka.jum@gmail.com

Abstract. Currently, phase-change chalcogenide materials, whose optical and electrical properties significantly change during phase transformations between amorphous and crystalline states, are successfully used to produce non-volatile electrical and optical memory as well as various tunable photonic devices. The principle of amorphization for these chalcogenide materials is based on the melting process. Determining the parameters of the phase transition between crystal and molten states and understanding all the related processes is critical to further increasing the number of operating cycles and optimizing the parameters of the devices being created, including their energy consumption. In this work, the results of the development, creation and launch of a hardware-software complex designed for measuring electrical resistance of chalcogenide materials during the heating process is presented. The developed complex allows measuring the temperature dependencies of the electrical resistance of various chalcogenide semiconductors, including their molten state. The complex can carry out the measurements both in air and in inert atmospheres, starting from room temperature up to 800 °C. The selenium and tellurium bulk materials were investigated to prove the operability of the complex. The test results were compared with the literature data and the results of differential scanning calorimetry and have shown high reproducibility.

Keywords: phase-change materials, chalcogenide semiconductors, phase-change memory, melting process, melting temperature, electrical properties, hardware-software complex

For citation: Lazarenko P. I. Measuring complex for studying temperature dependence of the electrical resistance of chalcogenide materials in the solid and molten states. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 158–167. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-158-167. – EDN: NVNAQJ.

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 20-79-10322, https://rscf.ru/project/20-79-10322/) in using Core facilities center “MEMS and electronic components”.

Acknowledgments: the author expresses gratitude to Babich A. V., Veretennikov V. V. and Morozov I. S. for technical assistance in measurements.

Введение. Современные информационные технологии требуют решения фундаментальных и прикладных задач при высокоскоростной передаче, обработке и хранении данных, отображении информации и управлении оптическими сигналами. Одна из таких задач – разработка и создание быстродействующих электрических, оптических и электрооптических элементов, обеспечивающих переключение между логическими состояниями и их энергонезависимое поддержание. Создание данных элементов может быть реализовано на основе функциональных материалов, способных реверсивно изменять свое фазовое состояние (Phase Change Material, PCM) [1–3]. На основе подобных материалов осуществляется производство энергонезависимой электрической фазовой памяти с произвольным доступом [4], создаются полностью оптические энергонезависимые элементы для фотонных ИС, например микрокольцевые резонаторы [5], интерферометры Маха – Цендера [6] и т. д., а также ИС систем отображения информации, таких как метаповерхности [7], компьютерно-генерируемые голограммы [8], оптические отражающие дисплеи [9] и т. д. Наиболее распространенный класс материалов, способных изменять свое фазовое состояние, – халькогенидные полупроводники, в том числе селениды (Sb_2Se_3, $Ga_1Sb_6Se_3$ и др.) и теллуриды (GeTe, $Ge_2Sb_2Te_5$ и др.) [1]. Тонкопленочные структуры данных соединений могут контролируемо совершать быстрые фазовые превращения между неупорядоченным, аморфным, и упорядоченным, кристаллическим, состояниями в результате тепловых, электрических воздействий и излучения и, как следствие, изменять свои оптические и электрофизические свойства [10].

Классический принцип перевода халькогенидного материала из кристаллического состояния в аморфное основан на процессе плавления. Вначале функциональную область халькогенидного материала нагревают выше температуры плавления, а далее быстро охлаждают до температуры ниже температуры кристаллизации. В данном процессе определяют максимальное энергопотребление разрабатываемых устройств. Процесс существенно влияет на стабильность и количество циклов работы элементов.

Однако анализ результатов по исследованию процесса плавления халькогенидных материалов показал существенный разброс данных, в частности по изменению удельного сопротивления для материала $Ge_2Sb_2Te_5$ [11]. Высокотемпературные исследования электрофизических свойств для таких сред, как расплавы халькогенидных полупроводников, предъявляют особые требования [12] к условиям их проведения и к устойчивости материалов измерительной ячейки и зондов, несоблюдение которых может быть одной из причин разброса данных в литературе.

В настоящей работе рассматривается аппаратно-программный комплекс (АПК) по измерению электрического сопротивления халькогенидных материалов во время нагрева.

Структура и принцип работы АПК. Принципиальная схема разработанного АПК, обеспечивающая измерение температурных зависимостей сопротивления материалов, в том числе халькогенидов в расплавленном состоянии, приведена на рис. 1. Основные функциональные блоки АПК следующие: измерительная ячейка, камера, система измерения электрофизических свойств, система вакуумирования и напуска инертных газов, система контроля и поддержания заданной температуры.

Высокотемпературные исследования электрофизических свойств для таких сред, как расплав полупроводника, предъявляют особые требования к материалам измерительной ячейки и зондов. Для проведения измерений при высоких температурах в АПК используют алундовые ячейки щелевого типа [13], изготовленные методом точного шликерного литья под давлением без дополнительной механической обработки. Схематичное изображение поперечного разреза ячейки представлено на рис. 2.

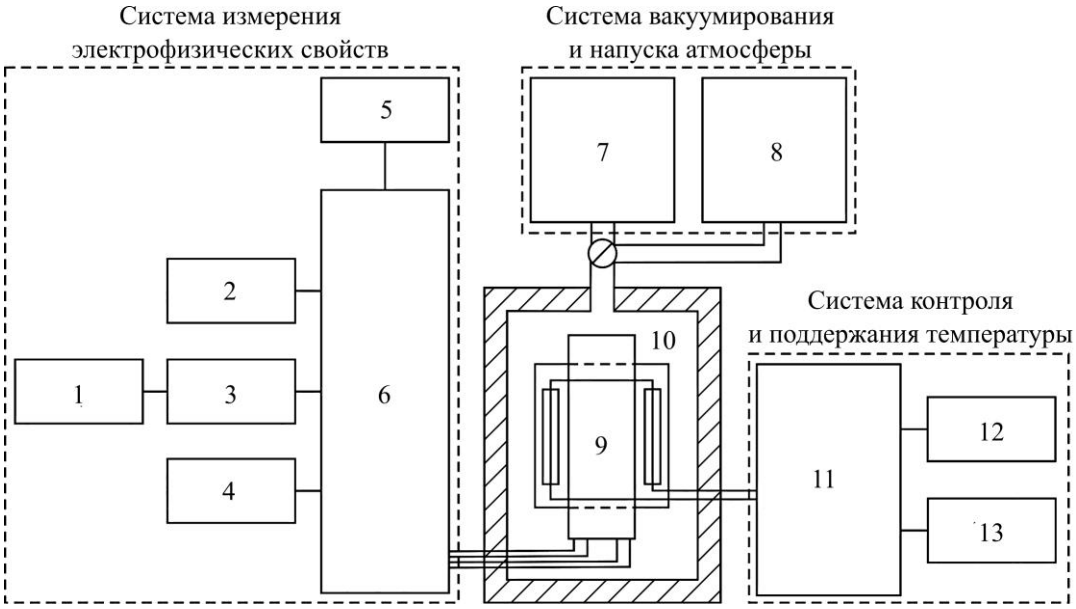


Рис. 1. Принципиальная схема АПК для исследования температурной зависимости электрического сопротивления полупроводниковых материалов в твердом и расплавленном состояниях: 1 – вольтметр АКИП В7; 2 – источник постоянного тока АКИП 1114; 3 – 10-канальный мультиплексор; 4 – мультиметр Keithley 2700; 5 – эталонный резистор; 6 – переключатель электрических контактов; 7 – вакуумный пост; 8 – система напуска; 9 – измерительная ячейка; 10 – резистивная нагревательная печь; 11 – вольтметр АКИП В7; 12 – автоматизированный контроллер DELTA DTA4848; 13 – регулятор мощности Fotek DSC-265

Fig. 1. Schematic diagram of the hardware-software complex for studying the temperature dependence of the electrical resistance of semiconductor materials in the solid and molten states: 1 – ACIP V7 voltmeter; 2 – ACIP 1114 DC power source; 3 – 10-channel multiplexer; 4 – Keithley 2700 multimeter; 5 – reference resistor; 6 – electrical contact switch; 7 – vacuum station; 8 – intake system; 9 – measuring cell; 10 – resistive heating furnace; 11 – ACIP V7 voltmeter; 12 – DELTA DTA4848 automated controller; 13 – Fotek DSC-265 power regulator

Для исследования материал в измельченном состоянии помещается в загрузочный контейнер и щелевое пространство ячейки, используемое в качестве рабочей зоны для измерения электрофизических свойств (см. рис. 2). Заполнение загрузочного контейнера материалом выполняется для компенсации усадки материала в процессе плавления, что позволяет избежать возникновения пустот в щелевом пространстве и, как следствие, нарушения электрического контакта. Загрузочный контейнер закрывается графитовой крышкой для уменьшения загрязнения камеры продуктами сублимации и испарения во время измерений.

Применение измерительной ячейки конструкции щелевого типа из алунда обеспечивает умеренный расход исследуемого материала, надежный электрический контакт с расплавом, постоянное межэлектродное расстояние и отсутствие химической реакции между материалами ячейки и исследуемым расплавом. Высота щелевого пространства 80 мм, ширина 10 мм, глубина 1 мм. Заполнение рабочей зоны ячейки щелевого типа материалом и надежность подведения графитовых контактов проверяются по значению электрического тока в измерительной цепи. В качестве электродов применяются предварительно обработанные стержни графита, заводимые в измерительную ячейку по специальным каналам. Две пары электродов используются для подачи электрического тока и измерения падения напряжения соответственно. Измерительная ячейка с исследуемым материалом располагается в резистивной нагревательной печи, управляемой системой контроля и поддержания заданной температуры на основе автоматизирован-

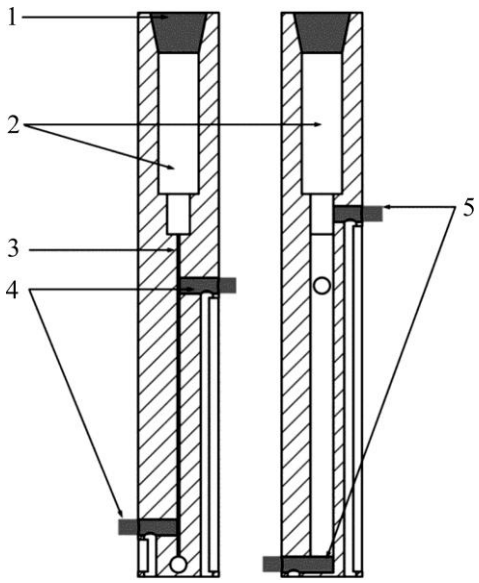


Рис. 2. Схематичное изображение измерительной ячейки: 1 – графитовая крышка; 2 – загрузочный контейнер; 3 – ячейка щелевого типа; 4, 5 – графитовые контакты
Fig. 2. Schematic representation of the measuring cell: 1 – graphite lid; 2 – loading container; 3 – slot type cell; 4, 5 – graphite contacts

ного контроллера DELTA DTA4848, регулятора мощности Fotek DSC-265, вольтметра АКИП В7 и подключенных к ним хромель-алюмелевых термопар (см. рис. 1). Измерительные термопары предварительно были откалиброваны с помощью калибратора Almatek ATC-320 и мультиметра Keithley 2002. Выявленные при калибровке отклонения измеряемой термопарой термоЭДС от значений, указанных в ГОСТ Р8.585-2001 ГСИ [14], учитываются программным обеспечением, что позволяет гарантировать погрешность измерения температуры на уровне не более ±1 °С.

Постоянная скорость нагрева и стабильная температура без перегрева и температурных колебаний поддерживается с помощью пропорционально-интегрально-дифференциального метода регулирования. Поддержание скорости изменения температуры при охлаждении в АПК не предусмотрено. Подбор коэффициентов для данного метода регулирования нагрева и поддержания температуры осуществляется с применением метода Коэна – Куна по экспериментально определенной кривой отклика системы. Проведенные испытания показали, что разброс температуры на противоположных концах измерительной ячейки не превышает 10 °С во всем исследуемом диапазоне температур.

Измерение электрического сопротивления исследуемого материала проводится с применением источника постоянного тока АКИП 1114, подключенного к крайним измерительным электродам и формирующего электрический ток в цепи, а также вольтметра АКИП В7, обеспечивающего измерение падения напряжения на образце и на эталонном резисторе за счет 10-канального мультиплексора и переключателя электрических контактов. Протекающий ток контролируется пикоамперметром Keithley 6485 и мультиметром Keithley 2700, которые позволяют фиксировать ток в диапазоне 0,1 нА – 3 А. Однако максимальное значение для используемого источника постоянного тока составляет 1, 2 А. Разрешение вольтметра АКИП В7 по напряжению равно 0,1 мкВ.

Для защиты исследуемого материала от окисления объем камеры, контур которой обозначен на рис. 1 заштрихованной областью, можно заполнить аргоном через систему напуска. Перед напуском инертного газа проводится откачка воздуха из камеры с применением вакуумного поста на основе форвакуумного насоса. Синхронность работы всех систем осуществляется с использованием разработанного в среде инженерного графического программирования LabView программного обеспечения, которое позволяет проводить измерения в автоматическом режиме по заранее заданной программе.

Результаты тестовых измерений. Работоспособность измерительного АПК проверяли по результатам измерения элементарных селена и теллура полупроводниковой степени чистоты в сопоставлении с результатами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). В качестве проверяемых использовали температуры начала и окончания фазового перехода кристалл – расплав. ДСК-исследования (TA Instruments SDT Q600 Series)

проводили при температурах от комнатной до 300 и 600 °С для селена и теллура соответственно. Измерения выполняли в атмосфере аргона, что позволило исключить влияние процессов окисления на результаты исследования. Нагрев проводили со скоростью 10 °С/мин. Для измерения использовали корундовые тигли. Предварительно калориметр был откалиброван по пяти стандартным образцам (In, Cd, Pb, Zn, Sn). Результаты измерения температурной зависимости электрического сопротивления R для селена и теллура в сопоставлении с данными литературных источников [15, 16] и результатами ДСК представлены на рис. 3, где $R/R_{100\,°C}$ и $R/R_{350\,°C}$ – соотношения измеренных сопротивлений к сопротивлениям, полученным при температурах 100 и 350 °С.

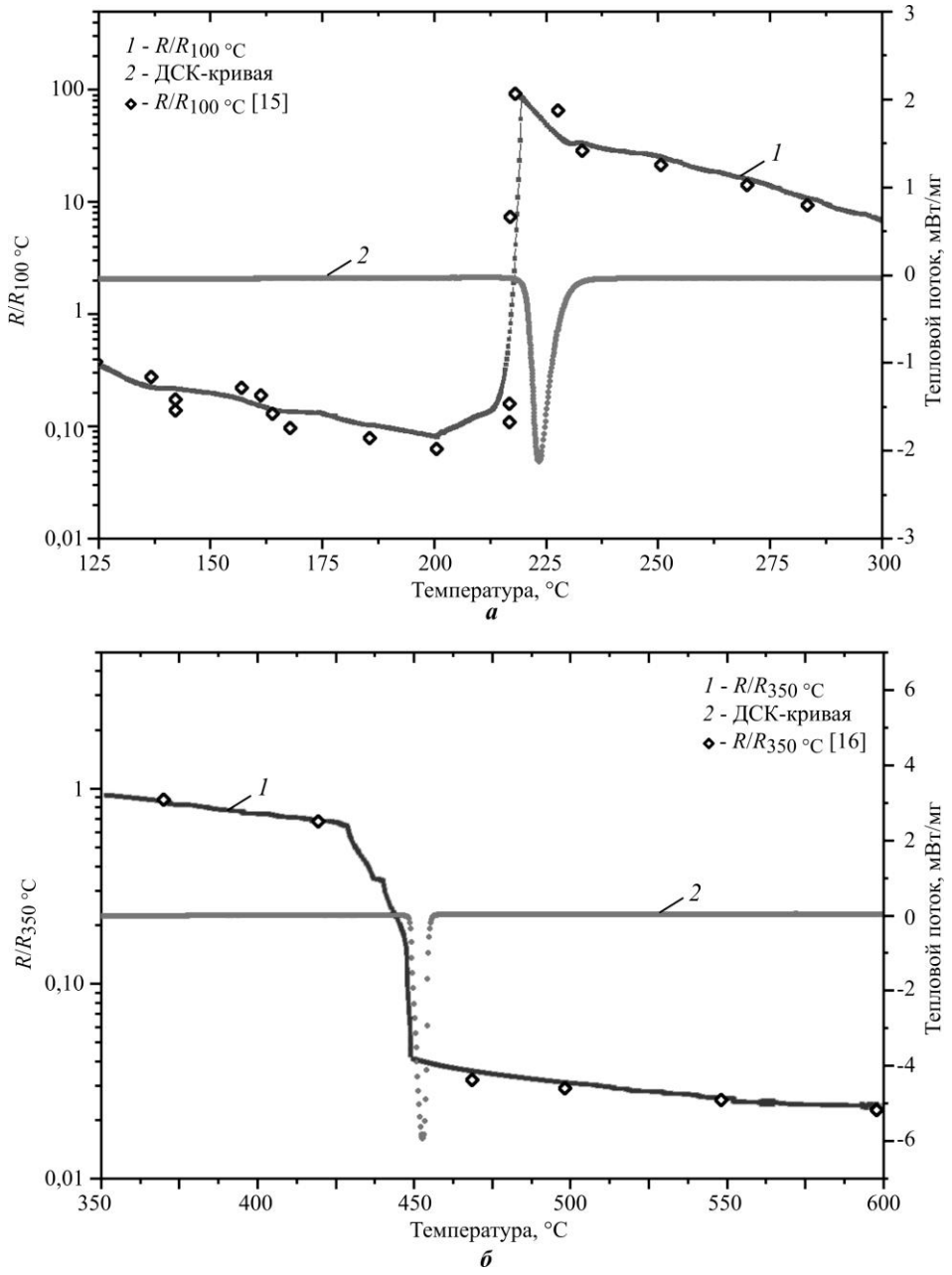


Рис. 3. Температурные зависимости электрического сопротивления для селена (*а*) и теллура (*б*)
Fig. 3. Temperature dependences of the electrical resistance for selenium (*a*) and tellurium (*b*)

Результаты измерений показали хорошую корреляцию между зафиксированным изменением электрического сопротивления в диапазоне температур 214–219 °C для селена и 447–449 °C для теллура, эндотермическими пиками на ДСК-кривых в диапазоне температур 218–230 °C для селена и 449–454 °C для теллура и справочными значениями температуры плавления, равной 220,8 °C для селена [17] и 449,8 °C для теллура [18]. Зафиксированное расхождение между температурами может быть обусловлено различной скоростью нагрева образцов, так как измерение электрического сопротивления проводили при скорости нагреве 1 °C/мин, а измерение теплового потока – при 10 °C/мин, и особенностями в подходах к определению температуры плавления различными методами.

После плавления селен и теллур сохраняют полупроводниковый характер электропроводности, что свидетельствует о плавлении по типу полупроводник – полупроводник согласно классификации А. Р. Регеля [19, 20] и соответствует результатам работ [12, 15, 16, 21, 22]. Следует отметить, что на результаты измерения электрофизических характеристик во время процесса плавления значительно влияет предварительная обработка исследуемых материалов. Например, существенное значение на перепад сопротивления во время процесса плавления селена может оказывать обескислороживание [12].

В настоящей работе исследовали материалы, которые не проходили никаких дополнительных стадий обработки. Полученные температурные зависимости электрического сопротивления для селена и теллура, нормированные по значениям, полученным при 100 °C ($R_{100\,°C}$) и 350 °C ($R_{350\,°C}$) соответственно, согласуются с литературными данными, представленными в работах [15, 16], как по характеру, так и по значениям изменения электрического сопротивления во время нагрева.

Заключение. Разработанный АПК позволяет проводить измерения температурных зависимостей электрического сопротивления различных полупроводниковых материалов, в том числе в расплавленном состоянии, от комнатной температуры до температуры 800 °C. Системы АПК обеспечивают проведение измерений как на воздухе, так и в инертной атмосфере, что дает возможность исследовать влияние атмосферы на процесс плавления, в том числе процесса окисления. Разработанное специальное программное обеспечение позволяет синхронно работать всем системам. Полученные результаты измерения температуры плавления селена и теллура, а также изменения электрического сопротивления исследуемых материалов при нагреве, в том числе во время плавления, демонстрируют высокую сходимость с литературными данными и результатами ДСК.

Таким образом, АПК для измерения электрического сопротивления халькогенидных материалов во время нагрева в твердом и жидком состояниях обеспечивает проведение оптимизации фазопеременных материалов, в том числе параметров процесса плавления, с целью увеличения количества рабочих циклов и оптимизации характеристик запоминающих устройств и перестраиваемых элементов фотоники.

Литература

1. ***Козюхин С. А., Лазаренко П. И., Попов А. И., Еременко И. Л.*** Материалы фазовой памяти и их применение // Успехи химии. 2022. Т. 91. № 9. Ст. RCR5033. EDN: MPYYZG.

2. ***Guo P., Sarangan A. M., Agha I.*** A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators // Appl. Sci. 2019. Vol. 9. Iss. 3. Art. No. 530. https://doi.org/10.3390/app9030530

3. ***Lotnyk A., Behrens M., Rauschenbach B.*** Phase change thin films for non-volatile memory applications // Nanoscale Adv. 2019. Vol. 1. Iss. 10. P. 3836–3857. https://doi.org/10.1039/C9NA00366E

4. 3D cross-point phase-change memory for storage-class memory / ***H.-Y. Cheng, F. Carta, W.-Ch. Chien et al.*** // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. Vol. 52. No. 47. Art. No. 473002. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab39a0

5. Size effect of the $Ge_2Sb_2Te_5$ cell atop the silicon nitride O-ring resonator on the attenuation coefficient / ***P. Lazarenko, V. Kovalyuk, P. An et al.*** // APL Mater. 2021. Vol. 9. Iss. 12. Art. No. 121104. https://doi.org/10.1063/5.0066387

6. Low power reconfigurable multilevel nanophotonic devices based on Sn-doped $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films / ***P. Lazarenko, V. Kovalyuk, P. An et al.*** // Acta Materialia. 2022. Vol. 234. Art. ID: 117994. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117994

7. Fabrication of $Ge_2Sb_2Te_5$ metasurfaces by direct laser writing technique / ***D. V. Bochek, K. B. Samusev, D. A. Yavsin et al.*** // Opt. Laser Technol. 2021. Vol. 141. Art. ID: 107124. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107124

8. Rewritable full-color computer-generated holograms based on color-selective diffractive optical components including phase-change materials / ***C.-Y. Hwang, G. H. Kim, J.-H. Yang et al.*** // Nanoscale. 2018. Vol. 10. Iss. 46. P. 21648–21655. https://doi.org/10.1039/C8NR04471F

9. ***Zhou T., Gao D., Cao Sh., Cheng Zh.*** Electrically tunable non-volatile reflective display pixel structure based on phase change material // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1544. Art. No. 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1544/1/012034

10. Влияние степени кристалличности на дисперсию оптических параметров тонких пленок фазовой памяти $Ge_2Sb_2Te_5$ / ***М. Е. Федянина, П. И. Лазаренко, Ю. В. Воробьев и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 203–218. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-3-203-218. – EDN: SCYZWB.

11. Activation energy of metastable amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ from room temperature to melt / ***S. Muneer, J. Scoggin, F. Dirisaglik et al.*** // AIP Advances. 2018. Vol. 8. Iss. 6. Art. No. 065314. https://doi.org/10.1063/1.5035085

12. ***Регель А. Р., Глазов В. М.*** Физические свойства электронных расплавов. М.: Наука, 1980. 295 с.

13. ***Казанджан Б. И.*** Методика исследования эффекта Холла в жидких полупроводниках // Заводская лаборатория. 1979. Т. 45. № 5. С. 433–435.

14. ГОСТ Р 8.585–2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. М.: Изд-во стандартов, 2002. III, 77 с.

15. ***Vezzoli G. C.*** Electrical resistance of liquid sulfur to 420 °C and of liquid selenium to 700 °C // J. Am. Ceram. Soc. 1972. Vol. 55. Iss. 2. P. 65–67. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1972.tb11210.x

16. ***Su C.-H.*** Semiconductor to metal transition in the solids/melts of Te and pseudo-binary of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ for x = 0, 0.1, and 0.2 // AIP Advances. 2021. Vol. 11. Iss. 4. Art. No. 045109. https://doi.org/10.1063/5.0043779

17. CRC Handbook of Chemistry and Physics / ed. ***D. R. Lide***. 88th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. 2640 p.

18. The Merck index: An encyclopedia of chemicals, drugs, and biological / ed. ***M. J. O'Neil***. 13th ed. Rahway, NJ: Merck and Co., 2001. 2564 p.

19. ***Регель А. Р., Глазов В. М., Крестовников А. Н.*** Жидкие полупроводники и перспективы их применения // Физ. и хим. обраб. матер. 1967. № 3. С. 118–131.

20. ***Регель А. Р., Глазов В. М., Крестовников А. Н.*** Особенности формирования электронных расплавов // Проблемы металлургии: сб. статей. М.: Металлургия, 1968. Вып. 52. С. 206.

21. ***Abdullaev G. B., Mekhtieva S. I., Abdinov D. Sh., Aliev G. M.*** Effect of oxygen on some electrical properties of selenium // Phys. Status Solidi B. 1965. Vol. 11. Iss. 2. P. 891–898. https://doi.org/10.1002/pssb.19650110239

22. ***Глазов В. М., Чижевская С. Н., Глаголева Н. Н.*** Жидкие полупроводники. М.: Наука, 1967. 244 с.

Статья поступила в редакцию 08.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.09.2023 г.;
принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторе

Лазаренко Петр Иванович – кандидат технических наук, начальник лаборатории материалов и устройств активной фотоники, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), aka.jum@gmail.com

References

1. Kozyukhin S. A., Lazarenko P. I., Popov A. I., Eremenko I. L. Phase change memory materials and their applications. *Russ. Chem. Rev.*, 2022, vol. 91, iss. 9, art. ID: RCR5033. https://doi.org/10.1070/RCR5033

2. Guo P., Sarangan A. M., Agha I. A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, iss. 3, art. no. 530. https://doi.org/10.3390/app9030530

3. Lotnyk A., Behrens M., Rauschenbach B. Phase change thin films for non-volatile memory applications. *Nanoscale Adv.*, 2019, vol. 1, iss. 10, pp. 3836–3857. https://doi.org/10.1039/C9NA00366E

4. Cheng H.-Y., Carta F., Chien W.-Ch., Lung H.-L., BrightSky M. 3D cross-point phase-change memory for storage-class memory. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, vol. 52, no. 47, art. no. 473002. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab39a0

5. Lazarenko P., Kovalyuk V., An P., Prokhodtsov A., Golikov A., Sherchenkov A., Kozyukhin S., Fradkin I. et al. Size effect of the $Ge_2Sb_2Te_5$ cell atop the silicon nitride O-ring resonator on the attenuation coefficient. *APL Mater.*, 2021, vol. 9, iss. 12, art. no. 121104. https://doi.org/10.1063/5.0066387

6. Lazarenko P., Kovalyuk V., An P., Kozyukhin S., Takáts V., Golikov A., Glukhenkaya V., Vorobyov Yu. et al. Low power reconfigurable multilevel nanophotonic devices based on Sn-doped $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films. *Acta Materialia*, 2022, vol. 234, art. ID: 117994. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117994

7. Bochek D. V., Samusev K. B., Yavsin D. A., Zhukov M. V., Limonov M. F., Rybin M. V., Shishkin I. I., Sinelnik A. D. Fabrication of $Ge_2Sb_2Te_5$ metasurfaces by direct laser writing technique. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 141, art. ID: 107124. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107124

8. Hwang C.-Y., Kim G. H., Yang J.-H., Hwang C.-S., Cho S. M., Lee W.-J., Pi J.-E., Choi J. H. et al. Rewritable full-color computer-generated holograms based on color-selective diffractive optical components including phase-change materials. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, iss. 46, pp. 21648–21655. https://doi.org/10.1039/C8NR04471F

9. Zhou T., Gao D., Cao Sh., Cheng Zh. Electrically tunable non-volatile reflective display pixel structure based on phase change material. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1544, art. no. 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1544/1/012034

10. Fedyanina M. E., Lazarenko P. I., Vorobyev Yu. V., Kozyukhin S. A., Dedkova A. A., Yakubov A. O., Levitskii V. S., Sagunova I. V., Sherchenkov A. A. Influence of crystallization degree on the optical parameters dispersion of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films for phase-change memory. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 203–218. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-3-203-218. – EDN: SCYZWB.

11. Muneer S., Scoggin J., Dirisaglik F., Adnane L., Cywar A., Bakan G., Cil K., Lam C., Silva H., Gokirmak A. Activation energy of metastable amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ from room temperature to melt. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, iss. 6, art. no. 065314. https://doi.org/10.1063/1.5035085

12. Regel' A. R., Glazov V. M. *Physical properties of electron melts.* Moscow, Nauka Publ., 1980. 295 p. (In Russian).

13. Kazandzhan B. I. Methodology of Hall effect studying in liquid semiconductors. *Zavodskaya laboratoriya = Industrial Laboratory*, 1979, vol. 45, no. 5, pp. 433–435. (In Russian).

14. *GOST R 8.585–200. State system for ensuring the uniformity of measurements. Thermocouples. Nominal static characteristics of conversion.* Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2022. iii, 77 p. (In Russian).

15. Vezzoli G. C. Electrical resistance of liquid sulfur to 420 °C and of liquid selenium to 700 °C. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1972, vol. 55, iss. 2, pp. 65–67. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1972.tb11210.x

16. Su C.-H. Semiconductor to metal transition in the solids/melts of Te and pseudo-binary of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ for $x = 0$, 0.1, and 0.2. *AIP Advances*, 2021, vol. 11, iss. 4, art. no. 045109. https://doi.org/10.1063/5.0043779

17. Lide D. R., ed. *CRC Handbook of Chemistry and Physics.* 88th ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2007. 2640 p.

18. O'Neil M. J., ed. *The Merck index: An encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals.* 13th ed. Rahway, NJ, Merck and Co., 2001. 2564 p.

19. Regel' A. R., Glazov V. M., Krestovnikov A. N. Liquid semiconductors and prospects for their application. *Fiz. i khim. obrab. mater. = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1967, no. 3, pp. 118–131. (In Russian).

20. Regel' A. R., Glazov V. M., Krestovnikov A. N. Features of the formation of electronic melts. *Problemy metallurgii*, collected papers. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968, iss. 52, p. 206. (In Russian).

21. Abdullaev G. B., Mekhtieva S. I., Abdinov D. Sh., Aliev G. M. Effect of oxygen on some electrical properties of selenium. *Phys. Status Solidi B*, 1965, vol. 11, iss. 2, pp. 891–898. https://doi.org/10.1002/pssb.19650110239

22. Glazov V. M., Chizhevskaya S. N., Glagoleva N. N. *Liquid semiconductors.* Moscow, Nauka Publ., 1967. 244 p. (In Russian).

The article was submitted 08.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the author

Peter I. Lazarenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Active Photonic Materials and Devices, Assoc. Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aka.jum@gmail.com

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

Научная статья
УДК 538.975 + 621.316.849
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-168-174
EDN: TNSMGS

Исследование роли гидростатических эффектов в слое расплава олова в формировании вакуумно-плотного SLID-соединения Cu-Sn

А. Б. Грабов, Д. Д. Рискин, С. Ю. Суздальцев, Д. Ю. Обижаев, С. А. Жукова

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики, г. Москва, Россия

mail@cniihm.ru

Аннотация. При герметизации микроэлектромеханических систем SLID-соединением Cu-Sn в процессе бондинга в слое расплава олова возникают локальные утолщения – булги, препятствующие образованию вакуумно-плотного SLID-соединения Cu-Sn. В работе с помощью средств видеофиксации установлена причина образования булгов при действии гидростатических сил поверхностного натяжения в расплаве олова. Показана взаимосвязь наличия булгов с изменением режима диффузии олова в матрицу меди и обеспечением вакуумной плотности SLID-соединения. Экспериментально подтверждено, что наиболее стабильный режим диффузии олова в медь и образование вакуумно-плотного SLID-соединения в процессе бондинга обеспечивает слой олова с толщиной меньше критического радиуса Лапласа.

Ключевые слова: бондинг, SLID-соединение, поверхностное натяжение, корпусирование на пластине

Для цитирования: Исследование роли гидростатических эффектов в слое расплава олова в формировании вакуумно-плотного SLID-соединения Cu-Sn / А. Б. Грабов, Д. Д. Рискин, С. Ю. Суздальцев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 168–174. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-168-174. – EDN: TNSMGS.

© А. Б. Грабов, Д. Д. Рискин, С. Ю. Суздальцев, Д. Ю. Обижаев, С. А. Жукова, 2024

Original article

Study on the role of hydrostatic effects in molten Sn layer in the formation of a vacuum-tight SLID coupling of Cu-Sn

A. B. Grabov, D. D. Riskin, S. Yu. Suzdaltsev, D. Yu. Obizhaev, S. A. Zhukova

Central Research Institute of Chemistry and Mechanics, Moscow, Russia

mail@cniihm.ru

Abstracts. During MEMS pressure sealing by SLID junction of Cu-Sn, in process of bonding, local bulges appear in molten Sn layer and hinder the formation of vacuum-tight SLID coupling of Cu-Sn. In this work, using means of video recording the cause of bulges formation by hydrostatic surface tension forces in melted Sn has been identified. The interrelation of bulges presence with changes in regime of Sn diffusion to Cu matrix and ensuring vacuum tightness of SLID coupling is shown. It was experimentally confirmed that the most stable regime of Sn diffusion to Cu matrix and the formation of vacuum-tight SLID coupling during bonding are provided by Sn layer having a thickness lesser than critical Laplace radius.

Keywords: bonding, SLID, surface tension, Wafer Level Packaging

For citation: Grabov A. B., Riskin D. D., Suzdaltsev S. Yu., Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A. Study on the role of hydrostatic effects in molten Sn layer in the formation of a vacuum-tight SLID coupling of Cu-Sn. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 168–174. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-168-174. – EDN: TNSMGS.

Введение. Технология корпусирования на пластине (Wafer Level Packaging, WLP) решает не только проблему снижения степени дезинтеграции электронных приборов в звене кристалл ИС – печатная плата, но и проблему соблюдения закона Мура. Очевидно, что возможности данной технологии могут с успехом применяться и для решения проблемы герметизации приборов МЭМС и НЭМС [1]. В технологии корпусирования на пластине применяется такой метод герметизации, как твердотельно-жидкостное взаимодиффузионное (Solid-Liquid Inter-Diffusion, SLID) соединение. SLID-соединение основано на образовании эвтектического сплава в двухкомпонентных металлических системах [2].

В настоящей работе рассматриваются проблемы технологии формирования многослойной SLID-системы для герметизации МЭМС-устройств, где в качестве низкоплавкого контактного металла используется олово (Sn), а в качестве металла-основы с высокой температурой плавления – медь (Cu).

Постановка проблемы. Из металлургии системы Cu-Sn известно существование двух интерметаллидов: Cu_6Sn_5 (η-фаза) и Cu_3Sn (ε-фаза). Нагрев до температуры плавления $t_п$(Sn) происходит на стадии бондинга, при этом Sn растворяется в Cu и на поверхности последней начинается рост тугоплавкой интерметаллидной фазы. SLID-процесс заканчивается, когда Sn в процессе термодиффузии прореагирует с образованием Cu_3Sn. Механическая прочность и вакуумная плотность SLID-соединения определяются полнотой трансформации Sn в ε-фазу [3].

При проведении процессов бондинга первых партий пластин с использованием технологии корпусирования на пластине (основание – крышка) возникла проблема коробления пластин. Из-за коробления пластины с почти готовыми МЭМС-структурами на завершающей операции – герметизации – отправляли в брак. Причина коробления – появление на уплотнительных кольцах бугорков расплавленного олова – булгов. Булги не исчезали, даже если к пластинам прикладывали усилия до 5000 Н (рис. 1). По окончании бондинга пара пластин с эффектом булгинга легко разделялась и на поверхности уплотнительных колец наблюдались сохранившиеся отвердевшие оловянные булги высотой до 8–10 мкм.

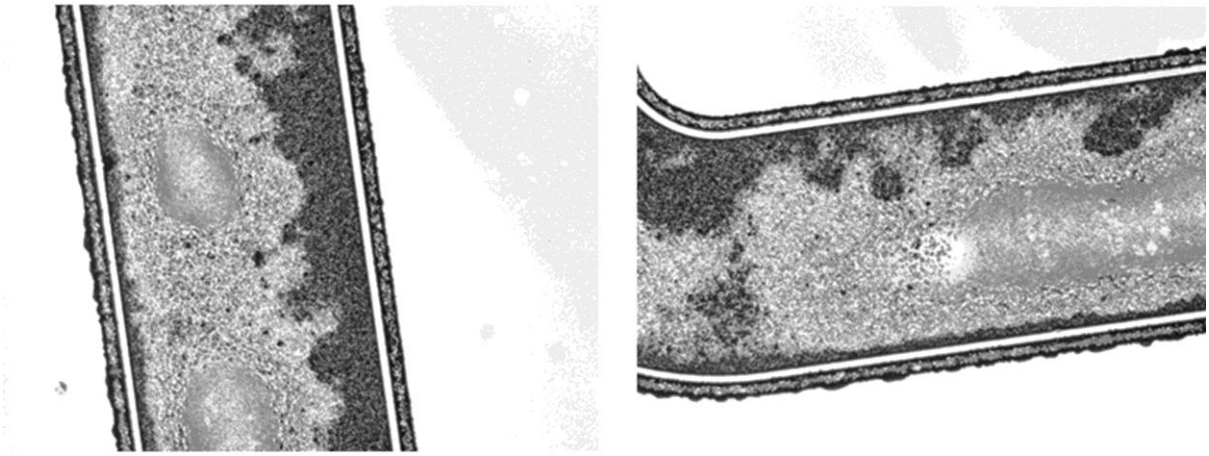


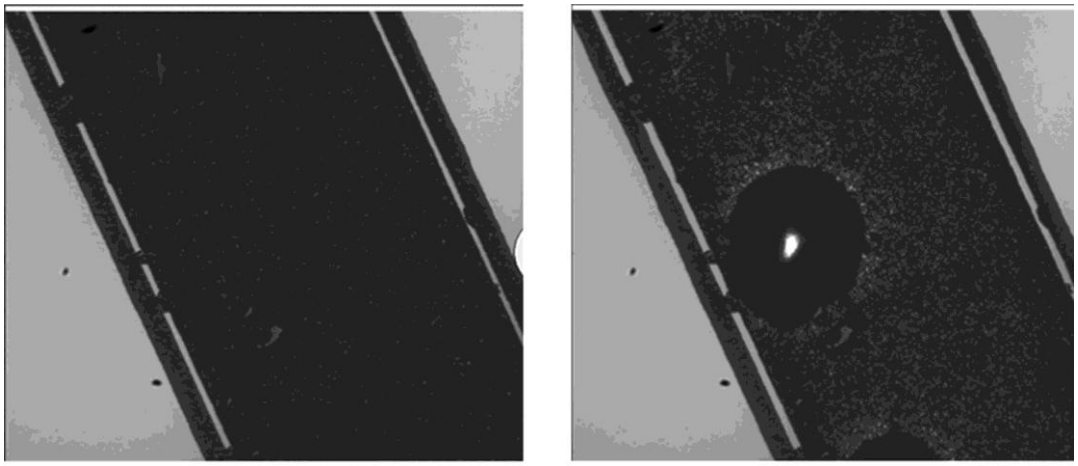
Рис. 1. Микрофотография булгов Sn на поверхности уплотнительных колец (200×)
Fig. 1. Tin bulges micrograph on sealing rings surface (200×)

Влияние булгинга на качество SLID-соединения обусловлено как минимум двумя проблемами:

– возникновение в процессе совмещения тангенциальных смещающих сил, направленных вдоль пластины. Тангенциальные силы являются причиной возникновения пор, каверн и разрывов;

– разное время диффузии Sn в областях булгинга и во впадинах. Если во впадине процесс диффузии Sn в матрицу Cu идет без соединения со слоем Sn на противоположной пластине, то в области булгинга процесс диффузии затягивается и до окончания выдержки не образуется слой интерметаллического соединения на всю толщину булга.

Первый метод исследования процесса образования булгов – видеонаблюдение. Его осуществляли с помощью встроенной системы видеофиксации полуавтоматической установки бондинга. Пластину со сформированной SLID-структурой Cu-Sn (10 : 6 мкм) размещали на столике установки бондинга и нагревали до температуры 280 °С. При этом уплотнительное кольцо на пластине наблюдали с помощью видеокамеры с разрешением 1280 : 960 пкс. После расплавления Sn в месте видеонаблюдения зафиксирован момент образования булга с разницей в 2 с и 1 °С (рис. 2) – олово на ровной поверхности в течение 2 с собирается в каплю округлой формы.



а ***б***

Рис. 2. Кадры видеозахвата процесса образования булгов Sn: *а* – T_{upper} = 225 °C; T_{low} = 246 °C; τ = 1′47″; *б* – T_{upper} = 226 °C; T_{low} = 248 °C; τ = 1′49″

Fig. 2. Video capture frames with the Sn bulges formation process: *a* – T_{upper} = 225 °C; T_{low} = 246 °C; τ = 1′47″; *b* – T_{upper} = 226 °C; T_{low} = 248 °C; τ = 1′49″

Гидростатический эффект в расплаве Sn. Согласно литературным источникам [4, 5] в расплаве Sn наблюдается гидростатический эффект, а именно действие сил поверхностного натяжения. Данные силы адекватно описываются классической формулой Лапласса [4, 6]:

$$F = \pi R_1^2 \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) - 2\pi R_1 \cos\beta, \qquad (1)$$

где R_1, R_2 – радиусы кривизны жидкости, причем $R_2 = \frac{h_i}{2}$ (h_i – толщина слоя расплава); γ – коэффициент поверхностного натяжения; β – поверхностный угол смачивания.

Для рассматриваемого случая γ_{Sn} = 0,56 Н/м, а R_1 имеет порядок ширины дорожки уплотнительного кольца (1200 мкм) [7–9]. Решая уравнение относительно h_i, получаем максимально допустимое значение толщины слоя Sn h_{crit} = 2,95 мкм.

Эксперимент. На двух пластинах Si диаметром 100 мм гальванически сформировали SLID-структуры Cu-Sn. Толщина слоя Cu для данного случая ≈ 6,0 мкм, толщина слоя Sn составляет ≤ 2,85 мкм. Пластины установили на столике полуавтоматической установки бондинга и нагревали до температуры 280 °C в течение 40 мин при вакуумировании до $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Состояние слоя Sn на поверхности уплотнительных колец наблюдали с помощью встроенной системы видеофиксации бондера (рис. 3).

Начало плавления Sn наступает при достижении по показаниям датчика бондера температуры 237 °C и сопровождается относительным осветлением поверхности металла. Полное расплавление наступает примерно еще через 3 мин при достижении температуры 276 °C. Оно сопровождается большим визуальным осветлением расплава, связанным с полным растворением в нем окисной пленки. Начиная с 12-й минуты выдержки на поверхности расплава Sn образуются небольшие темные пятна округлой формы, соответствующие областям диффузии Sn в матрицу Cu. Число пятен в процессе диффузии все время увеличивается, и по окончании выдержки большую часть поверхности занимает интерметаллид, а на отдельных участках поверхности остается Sn. Толщина слоя Sn в ходе выдержки уменьшается равномерно, и при этом не наблюдается образования капелевидных булгов. Это связано с тем, что толщина слоя Sn меньше максимально допустимого значения h_{crit}.

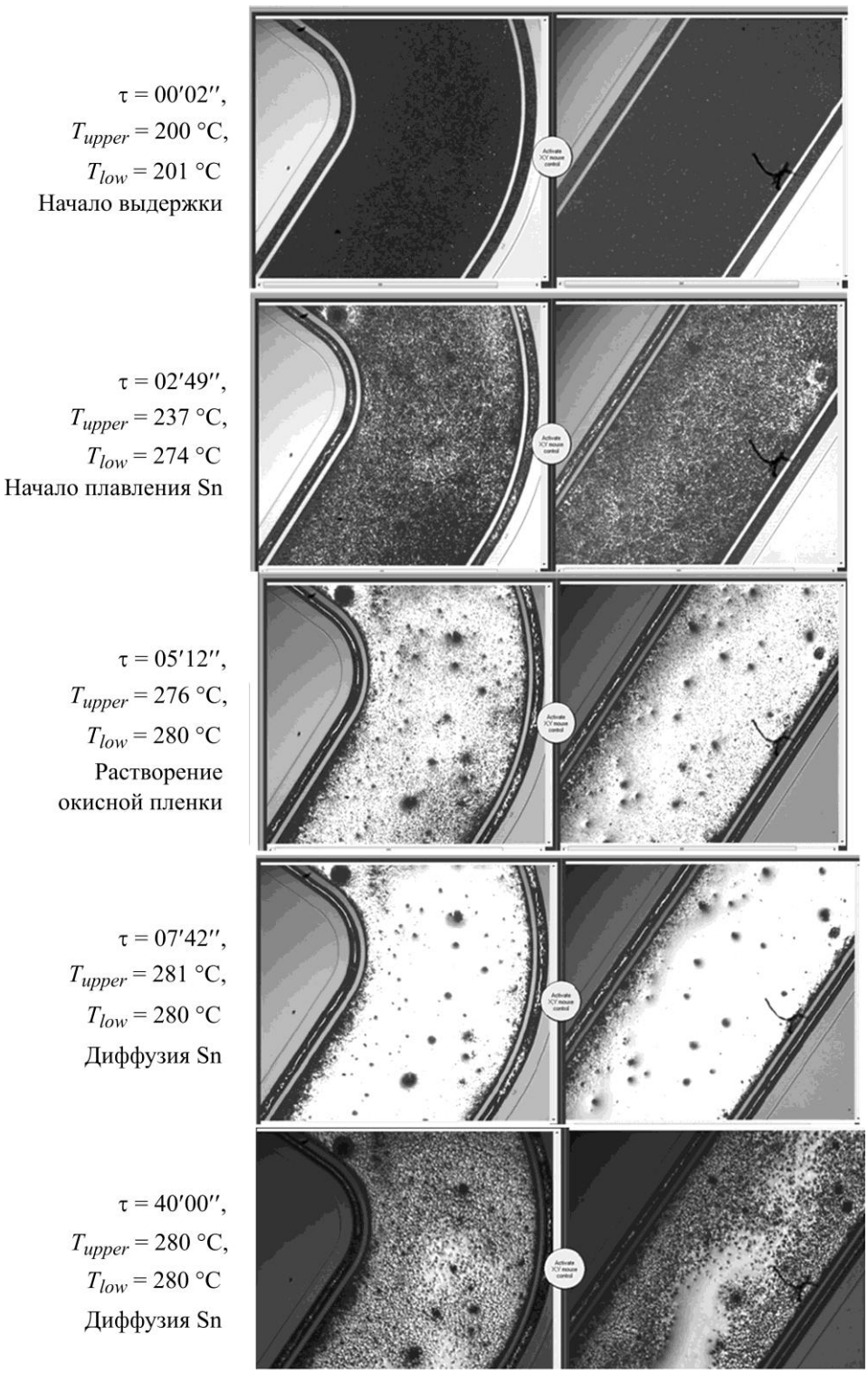


Рис. 3. Видеофиксация поверхности уплотнительных колец в разные моменты времени
Fig. 3. Video fixation of the sealing rings surfaces at different time moments

Заключение. Исследования показали, что вакуумная плотность SLID-соединения обеспечивается единообразием режима диффузии слоя Sn в матрицу Cu по всей соединяемой поверхности. Областями наиболее вероятного нарушения единообразия могут стать области булгинга, образующиеся в расплаве Sn в результате действия сил поверхностного натяжения. Для решения проблемы образования булгов необходимо регулировать угол смачивания поверхности Cu расплавом Sn – толщина слоя Sn не должна превышать критический радиус Лапласа h_{crit}.

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

Литература

1. Wafer level solid liquid interdiffusion bonding: Formation and evolution of microstructures / ***V. Vuorinen, H. Dong, G. Ross et al.*** // J. Electron. Mater. 2020. Vol. 50. Iss. 3. P. 818–824. https://doi.org/10.1007/s11664-020-08530-y

2. Cu/Sn solid–liquid interdiffusion bonding / ***A. Munding, H. Hübner, A. Kaiser et al.*** // Wafer Level 3-D ICs Process Technology / eds C. Tan, R. Gutmann, L. Reif. Boston: Springer, 2008. P. 131–169. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76534-1_7

3. In situ imaging of the soldering reactions in nanoscale Cu/Sn/Cu and Sn/Cu/Sn diffusion couples / ***Q. Yin, F. Gao, Zh. Gu et al.*** // J. Appl. Phys. 2018. Vol. 123. Iss. 2. Art. No. 024302. https://doi.org/10.1063/1.4995314

4. ***Kumar S., Handwerker C. A., Dayananda M. A.*** Intrinsic and interdiffusion in Cu-Sn system // J. Phase Equilib. Diffus. 2011. Vol. 32. Iss. 4. P. 309–319. https://doi.org/10.1007/s11669-011-9907-9

5. ***Luu T.-T., Duan A., Aasmundtveit K. E., Hoivik N.*** Optimized Cu-Sn wafer-level bonding using intermetallic phase characterization // J. Electron. Mater. 2013. Vol. 42. Iss. 12. P. 3582–3592. https://doi.org/10.1007/s11664-013-2711-z

6. Molecular dynamics study on mechanical properties of nanopolycristalline Cu–Sn alloy / ***G. Zhang, J. Zhao, P. Wang et al.*** // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 24. Art. No. 7782. https://doi.org/10.3390/ma14247782

7. ***Karthik M., Abhinav J., Shankar K. V.*** Morphological and mechanical behavior of Cu–Sn alloys – A review // Met. Mater. Int. 2021. Vol. 27. Iss. 7. P. 1915–1946. https://doi.org/10.1007/s12540-020-00899-z

8. ***Farrens S., Sood S.*** Wafer level packaging: Balancing device requirements and materials properties // Süss MicroTec [Электронный ресурс]. Jan. 2008. URL: https://www.suss.com/en/news/technical-publications/wafer-level-packaging-balancing-device-requirements-and-materials-properties (дата обращения: 15.12.2023).

9. Growth behavior and formation mechanism of porous Cu_3Sn in Cu/Sn solder system / ***K. Lin, H. Ling, A. Hu et al.*** // Mater. Charact. 2021. Vol. 178. Art. ID: 111271. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111271

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 09.11.2023 г.;
принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Грабов Алексей Борисович – ведущий инженер Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А), mail@cniihm.ru

Рискин Дмитрий Дмитриевич – ведущий инженер Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А), mail@cniihm.ru

Суздальцев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А), mail@cniihm.ru

Обижаев Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А), mail@cniihm.ru

Жукова Светлана Александровна – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательского центра Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А), mail@cniihm.ru

References

1. Vuorinen V., Dong H., Ross G., Hotchkiss J., Kaaos J., Paulasto-Kröckel M. Wafer level solid liquid interdiffusion bonding: Formation and evolution of microstructures. *J. Electron. Mater.*, 2020, vol. 50, iss. 3, pp. 818–824. https://doi.org/10.1007/s11664-020-08530-y

2. Munding A., Hübner H., Kaiser A., Penka S., Benkart P., Kohn E. Cu/Sn solid–liquid interdiffusion bonding. *Wafer Level 3-D ICs Process Technology*, eds C. Tan, R. Gutmann, L. Reif. Boston, Springer, 2008, pp. 131–169. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76534-1_7

3. Yin Q., Gao F., Gu Zh., Wang J., Stach E. A., Zhou G. In situ imaging of the soldering reactions in nanoscale Cu/Sn/Cu and Sn/Cu/Sn diffusion couples. *J. Appl. Phys.*, 2018, vol. 123, iss. 2, art. no. 024302. https://doi.org/10.1063/1.4995314

4. Kumar S., Handwerker C. A., Dayananda M. A. Intrinsic and interdiffusion in Cu-Sn system. *J. Phase Equilib. Diffus.*, 2011, vol. 32, iss. 4, pp. 309–319. https://doi.org/10.1007/s11669-011-9907-9

5. Luu T.-T., Duan A., Aasmundtveit K. E., Hoivik N. Optimized Cu-Sn wafer-level bonding using intermetallic phase characterization. *J. Electron. Mater.*, 2013, vol. 42, iss. 12, pp. 3582–3592. https://doi.org/10.1007/s11664-013-2711-z

6. Zhang G., Zhao J., Wang P., Li X., Liu Y., Fu X. Molecular dynamics study on mechanical properties of nanopolycristalline Cu–Sn alloy. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 24, art. no. 7782. https://doi.org/10.3390/ma14247782

7. Karthik M., Abhinav J., Shankar K. V. Morphological and mechanical behavior of Cu–Sn alloys – A review. *Met. Mater. Int.*, 2021, vol. 27, iss. 7, pp. 1915–1946. https://doi.org/10.1007/s12540-020-00899-z

8. Farrens S., Sood S. Wafer level packaging: Balancing device requirements and materials properties. *Süss MicroTec.* Jan. 2008. Available at: https://www.suss.com/en/news/technical-publications/wafer-level-packaging-balancing-device-requirements-and-materials-properties (accessed: 15.12.2023).

9. Lin K., Ling H., Hu A., Wu Y., Gao L., Hang T., Li M. Growth behavior and formation mechanism of porous Cu_3Sn in Cu/Sn solder system. *Mater. Charact.*, 2021, vol. 178, art. ID: 111271. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111271

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 09.11.2023; accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Alexey B. Grabov – Senior Engineer, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16A), mail@cniihm.ru

Dmitry D. Riskin – Senior Engineer, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16A), mail@cniihm.ru

Sergey Yu. Suzdaltsev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16A), mail@cniihm.ru

Denis Yu. Obizhaev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16A), mail@cniihm.ru

Svetlana A. Zhukova – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Deputy Head of the Scientific Research Center, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16A), mail@cniihm.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья
УДК 621.372.56
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-175-184
EDN: NRUVQC

Влияние импульсной мощности на параметры пленочных поглощающих элементов

А. В. Пилькевич, В. Д. Садков

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

sadvd2016@mail.ru

Аннотация. Современному состоянию развития пленочных поглощающих элементов, применяющихся для построения волноводных, коаксиальных, полосковых и микрополосковых аттенюаторов и адаптоаттенюаторов, а также в гибридных интегральных схемах ВЧ- и СВЧ-диапазонов, присущи поиск путей повышения электрических характеристик и лучшее понимание происходящих в поглощающих элементах процессов. Значительный интерес представляет тепловая устойчивость поглощающих элементов при импульсном воздействии, зависящая от ряда трудно моделируемых конструктивно-технологических факторов. В работе с использованием программного комплекса Elcut проведено моделирование режима работы пленочного поглощающего элемента, в котором все выделяемое входными импульсами тепло поглощается пленкой с учетом зависимостей ее удельного поверхностного сопротивления и удельной теплоемкости от температуры. Исследованы зависимости плотности тепловыделения, распределения удельного поверхностного сопротивления и напряженности электрического поля по поверхности резистивной пленки для ряда топологий поглощающих элементов больших и малых ослаблений – типовых и оптимизированных – с более равномерным распределением плотности тока и градиентов потенциала по поверхности пленки. Предложена методика и приведены зависимости входного сопротивления и ослабления поглощающего элемента от энергии входного импульса, удельной теплоемкости и температурного коэффициента удельного сопротивления с учетом их температурных зависимостей для типовых материалов резистивных пленок. Показано, что ключевые параметры поглощающих элементов могут изменяться в ряде случаев более чем на 40 % по ослаблению и более чем на 80 % по входному сопротивлению. Предложенная методика может быть использована для определения максимальной энергии входного импульсного сигнала по наивысшей мгновенной допустимой температуре перегрева резистивной пленки.

© А. В. Пилькевич, В. Д. Садков, 2024

Ключевые слова: пленочный поглощающий элемент, аттенюатор, импульсный режим

Для цитирования: Пилькевич А. В., Садков В. Д. Влияние импульсной мощности на параметры пленочных поглощающих элементов // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 175–184. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-175-184. – EDN: NRUVQC.

Original article

The effect of pulse power on the parameters of film absorbing elements

A. V. Pilkevich, V. D. Sadkov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

sadvd2016@mail.ru

Abstract. Absorbing film elements are widely used for the construction of waveguide, coaxial, strip and microstrip attenuators and adaptoattenuators, as well as in hybrid RF and microwave integrated circuits. The current state of their development is characterized by the search for ways of electrical characteristics improvement, and better understanding of the processes occurring in the absorbing elements. The thermal stability of absorbing elements under pulsed action, depending on a number of difficult-to-model structural and technological factors, is of considerable interest. In this work, using the Elcut software package, a simulation of the operating mode of an absorbing film element was carried out, in which all the heat generated by the input pulses is absorbed by the film, with account for the dependences of its specific surface resistance and specific heat capacity on temperature. The dependences of the heat release density, the distribution of the specific surface resistance and the electric field strength over the surface of the resistive film are investigated for a number of topologies of absorbing elements of large and small attenuations – typical and optimized, with a more uniform distribution of current density and potential gradients over the surface of the film. A technique is proposed and the dependences are given: of the absorbing element's input resistance and attenuation on the energy of the input pulse, on the specific heat capacity and on the temperature coefficient of resistivity, with account for their temperature dependences for typical materials of resistive films. It has been demonstrated that changes in the key parameters of the absorbing elements can exceed in some cases 40 % in attenuation and 80 % in input resistance. The proposed technique can be used to determine the maximum energy of the input pulse signal by the highest instantaneous permissible overheating temperature of the resistive film.

Keywords: absorbing film element, attenuator, pulse mode

For citation: Pilkevich A. V., Sadkov V. D. The effect of pulse power on the parameters of film absorbing elements. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 175–184. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-175-184. – EDN: NRUVQC.

Введение. Пленочные поглощающие элементы (ПЭ) широко используются для построения волноводных, коаксиальных, полосковых и микрополосковых аттенюаторов и адаптоаттенюаторов, а также в гибридных ИС ВЧ- и СВЧ-диапазонов. Современное состояние их развития характеризуется поиском путей повышения электрических параметров и лучшим пониманием происходящих в ПЭ тепловых процессов [1–5].

Основные способы повышения средней и импульсной мощности ПЭ – использование диэлектрических подложек с высокой теплопроводностью, повышение качества их поверхности, равномерности резистивного слоя, ровности его краев [6–11]. Увеличение импульсной мощности в 5–8 раз, средней – в 1,3–1,4 раза возможно при предварительном нанесении на подложку тонких покрытий с высокими теплоемкостью и теплопроводностью толщиной не менее глубины прогрева слоя за время воздействия импульса [12], а также при улучшении теплоотвода со стороны резистивной пленки путем нанесения на нее тонкой (≈ 0,5 мкм) теплоотводящей пленки из нитрида кремния. Повышение импульсной рассеиваемой мощности также достигается в ПЭ, изготовленных по толстопленочной технологии. Однако эта технология характеризуется худшей стабильностью параметров наносимых пленок и меньшей точностью формирования топологии [13, 14].

Для повышения частотно-мощностных характеристик применяется каскадное включение нескольких ПЭ, разделяемых отрезками однородных линий передачи. По сути, это переход к квазираспределенной структуре с множеством варьируемых параметров и распределением выделяющейся мощности по большей площади. Комбинация таких подходов со структурами с распределенными параметрами при использовании длинных линий с повышенными погонными потерями теоретически позволяет создавать аттенюаторы на базе ПЭ с предельно высокими частотно-мощностными характеристиками [15, 16].

Значительный интерес представляет тепловая устойчивость одиночных ПЭ, зависящая от ряда трудно моделируемых конструктивно-технологических факторов: выбранных материалов; технологии нанесения проводящих и резистивных пленок; структурной однородности резистивной пленки и качества поверхности подложки; топологии пленки, позволяющей снизить неравномерность тепловыделения и напряженности электрического поля по поверхности ПЭ; качества монтажа подложки на теплоотвод; условий теплопередачи от пленки в окружающую среду и т. п. [1–5, 17–19]. В ряде работ отмечается необходимость отдельного рассмотрения тепловых режимов ПЭ, диэлектрической подложки и тонкой резистивной пленки [1–3].

При моделировании теплового режима ПЭ, как правило, рассматриваются два крайних случая: выделяемое тепло успевает распределиться по материалу подложки, расчет ведется по средней мощности; материал резистивной пленки изолирован по передаче тепла от материала подложки, все выделяемое в ПЭ тепло поглощается пленкой, что позволяет рассчитать ее мгновенный перегрев. В первом случае не учитывается тепловая инерция передачи энергии от пленки в подложку и реальные значения мгновенного перегрева оказываются заниженными, во втором – не учитывается передача тепла в подложку и контакты.

В настоящей работе рассматривается второй случай, соответствующий максимально тяжелому режиму работы ПЭ, когда мгновенные значения выделяющейся тепловой энергии и градиенты потенциалов в разы превышают значения, соответствующие стационарному режиму. Полученное мгновенное распределение сохраняется в течение примерно 10^{-6} с, и далее за счет перехода тепла в подложку и контакты температура уменьшается и в стационарном режиме наибольшие ее значения отмечаются только в центре подложки [1]. С использованием отечественного программного комплекса Elcut [20]

определяется распределение рассеиваемой мощности по поверхности резистивной пленки и с учетом зависимости ее удельного поверхностного сопротивления и удельной теплоемкости от температуры находится реальное распределение удельного поверхностного сопротивления, входное сопротивление и ослабление ПЭ, включенного в 50-омную линию. Отметим, что условия, при которых тепло между импульсами может отдаваться в подложку, приведены в работе [1].

Методика и результаты моделирования. Анализ влияния импульсного режима на ключевые параметры ПЭ проводили для ПЭ типовой прямоугольной топологии и топологии с оптимизированным профилем входных контактов для повышения равномерности распределения плотности тока и градиентов потенциала по поверхности пленки (рис. 1) [17–19].

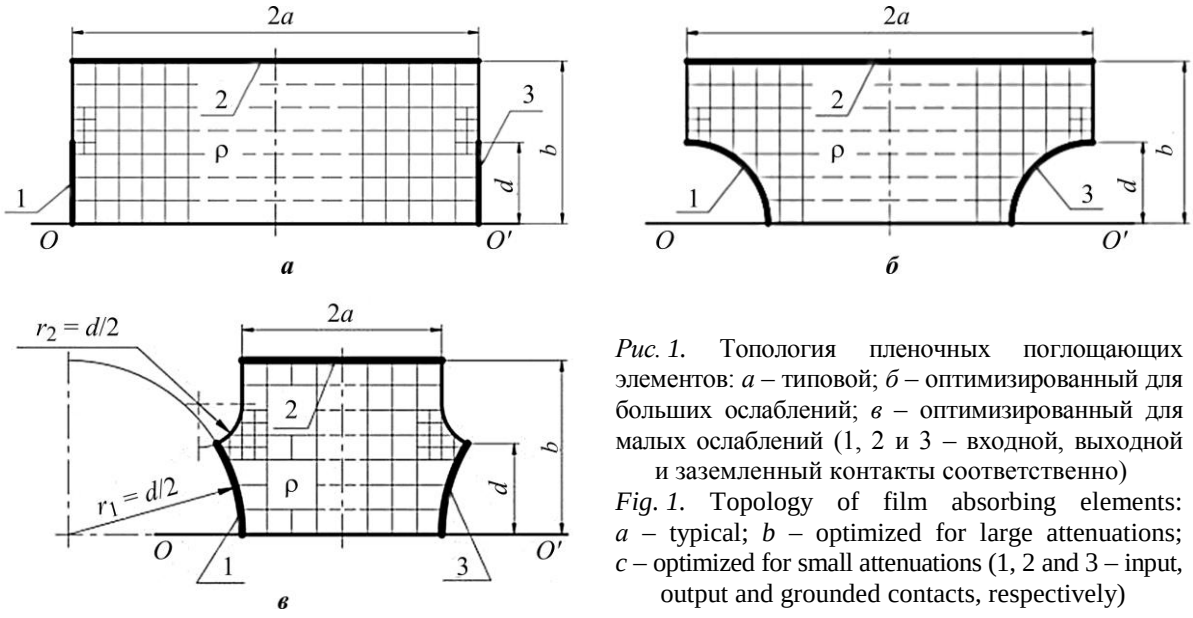


Рис. 1. Топология пленочных поглощающих элементов: *а* – типовой; *б* – оптимизированный для больших ослаблений; *в* – оптимизированный для малых ослаблений (1, 2 и 3 – входной, выходной и заземленный контакты соответственно)

Fig. 1. Topology of film absorbing elements: *a* – typical; *b* – optimized for large attenuations; *c* – optimized for small attenuations (1, 2 and 3 – input, output and grounded contacts, respectively)

Для удобства моделирования рассматривали половину ПЭ относительно оси симметрии OO'. Их входное сопротивление $R_{вх}$ = 50 Ом, толщина резистивной пленки 300–600 Å, размеры a, b и d выбирали из условия реализации малых (5 дБ, a = 0,5 мм, b = 3,5 мм, $d = b/2$) и больших (20 дБ, $a = b$ = 3,5 мм, $d = b/2$) ослаблений. В качестве материалов резистивных пленок использовали нихром Х20Н80, хром, тантал, для которых в отличие от сплавов типа РС известны зависимости удельного сопротивления, теплоемкости и теплопроводности от температуры вплоть до 1000–1200 °С. Перечисленные зависимости для сплавов РС определяли в первом приближении через параметры исходных материалов и их содержание в сплаве в массовых долях (процентах) [21]. Поскольку распределение тепловой энергии в ПЭ существенно неравномерно, область резистивной пленки разделяли на элементы размерами 0,05 × 0,05 мм (вблизи входного / выходного контакта – на элементы размерами 0,025 × 0,025 мм). В каждом из них определяли температуру и удельное сопротивление с учетом температурных зависимостей удельного сопротивления и удельной теплоемкости.

Энергию импульса длительностью $\leq 10^{-6}$ с выбирали из условия, что максимально достигаемая температура пленки не превысит ≈ 1000 °С (перегрев ΔT относительно комнатной температуры). Это соответствует кратковременной устойчивой работе пленки. Перегрев определяли из соотношения

$$Q = P\tau = Cm\Delta T,$$

где Q – энергия импульса, выделившаяся за время τ его действия, Дж; P – мощность импульса, Вт; C – удельная теплоемкость, зависящая от температуры, Дж/(кг·град); m – масса выделенного элемента пленки, кг; ΔT – перегрев элемента, °С.

По рассчитанному перегреву в каждом элементе пленки вычисляли удельное сопротивление ρ с учетом его зависимости от температуры ΔT:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T),$$

где ρ_0 и α – удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки и его температурный коэффициент соответственно. Для нихрома Х20Н80 $\alpha = (13–17)\cdot10^{-5}$ °С$^{-1}$.

Значения и зависимость удельной теплоемкости C и температурного коэффициента α от температуры для типовых материалов резистивных пленок определяли согласно работе [21]. Для получения входного / выходного сопротивления 50 Ом удельное поверхностное сопротивление ρ_0 для топологии на рис. 1, *а* составляло 50 Ом/□, для топологии на рис. 1, *б*, *в* равно 70 Ом/□.

Созданную в программном комплексе Elcut кусочно-однородную модель с вычисленными значениями удельного сопротивления ρ в элементах пленки использовали далее для определения параметров П-образной схемы замещения ПЭ, его входного / выходного сопротивления $R_{вх}/R_{вых}$ и ослабления q. Результаты распределения тепла, удельных поверхностных сопротивлений и напряженностей электрического поля с учетом зависимостей теплоемкости и удельного сопротивления от температуры для нихрома Х20Н80 приведены на рис. 2 и 3. Расчет проводили при следующих исходных параметрах: P = 1,5 Вт, $\tau = 10^{-7}$ с, максимальная температура вблизи входного контакта ПЭ на рис. 1, *а* достигала 1000 °С.

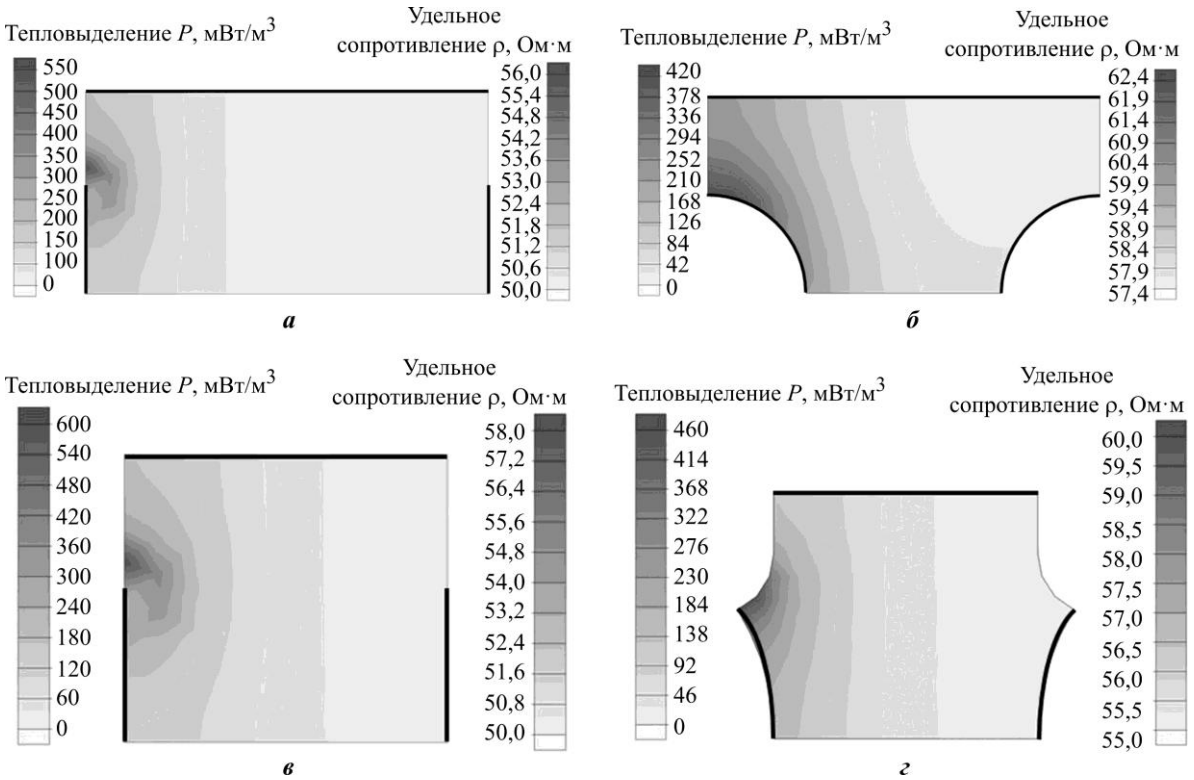


Рис. 2. Плотности тепловыделения и распределения удельного поверхностного сопротивления по поверхности в типовых (*а*, *в*) и оптимизированных (*б*, *г*) пленочных поглощающих элементах для ослаблений 20 дБ (*а*, *б*) и 5 дБ (*в*, *г*)

Fig. 2. Heat dissipation densities and distributions of specific surface resistance over the surface in typical (*a*, *c*) and optimized (*b*, *d*) film absorbing elements for attenuations of 20 dB (*a*, *b*) and 5 dB (*c*, *d*)

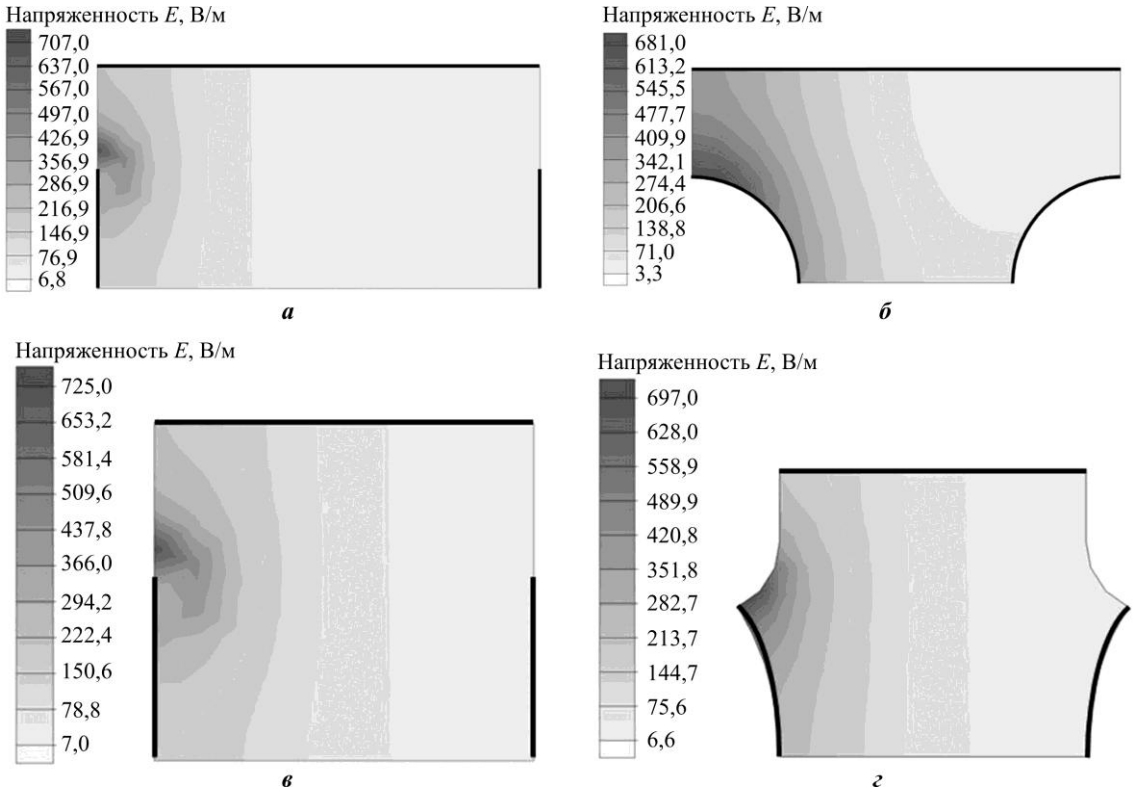


Рис. 3. Распределения напряженности поля в пленочных поглощающих элементах для ослаблений 20 дБ (*а*, *б*) и 5 дБ (*в*, *г*)

Fig. 3. Distribution of the field strength in film absorbing elements for attenuations of 20 dB (*a*, *b*) and 5 dB (*c*, *d*)

Топологии на рис. 1, *б*, *в* дают небольшой выигрыш в максимальных значениях напряженности поля по сравнению с топологией на рис. 1, *а*, но обеспечивают, как показали исследования в широком диапазоне ослаблений, уменьшение максимальной плотности тепловыделения вблизи входного контакта в 1,3 раза (среднее значение), что ослабляет возможности выгорания пленки и микропробоев, понижает уровень термомеханических напряжений в ПЭ.

Поскольку для большинства материалов резистивных пленок рабочая температура не превышает 250–300 °С, для импульсного режима при более высоких температурах температурный коэффициент α может составлять 10^{-3} °$С^{-1}$. Для типовых материалов резистивных пленок с диапазоном удельных теплоемкостей 100–600 Дж/(кг·град) на рис. 4 приведены зависимости ослабления q и входного сопротивления $R_{вх}$ от теплоемкости C и входной мощности P (длительность импульсов $\tau = 10^{-7}$ с) для нихрома с температурным коэффициентом сопротивления пленки $\alpha = 17 \cdot 10^{-5}$ °$С^{-1}$ и материала с $\alpha = 10^{-3}$ °$С^{-1}$.

Очевидно, что изменение ослабления ПЭ с активным входным сопротивлением $R_{вх}$, включенным в 50-омную линию, будет происходить и из-за возникновения рассогласования на входе. Коэффициент стоячей волны напряжения, равный $R_{вх}/50$, может достигать 1,8. Изменения выходного сопротивления малы и не учитывались. Отмечается существенная зависимость ослабления и входного сопротивления от мощности входного сигнала P, теплоемкости и температурного коэффициента сопротивления резистивной пленки α. Например, если при $C = 100$ Дж/(кг·град) и $\alpha = 17 \cdot 10^{-5}$ °$С^{-1}$ изменения эти могут составлять 5 % по q и 12 % по $R_{вх}$, то при $\alpha = 10^{-3}$ °$С^{-1}$ они достигают уже более 40 % по q и свыше 80 % по $R_{вх}$.

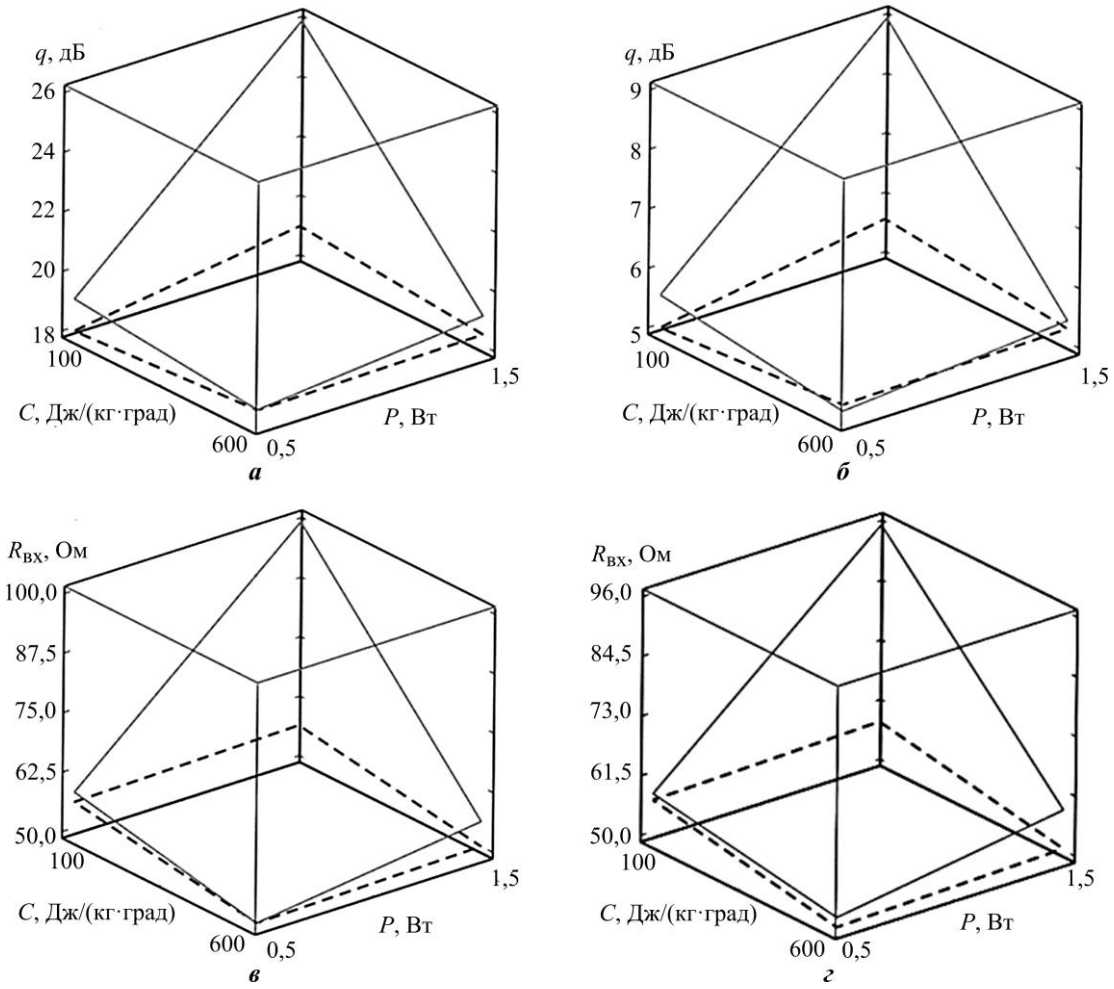


Рис. 4. Зависимости ослабления q и входного сопротивления $R_{вх}$ от удельной теплоемкости C и энергии импульса P для ослаблений 20 дБ (*а, в*) и 5 дБ (*б, г*): *а, б* – типовой пленочный элемент; *в, г* – оптимизированный пленочный элемент для больших и малых ослаблений соответственно (пунктирная линия – $\alpha = 17 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$, сплошная линия – $\alpha = 10^{-3}\ °C^{-1}$)

Fig. 4. Dependences of attenuation q and input resistance $R_{вх}$ on the specific heat capacity C and pulse energy P for attenuations of 20 dB (*a, c*) and 5 dB (*b, d*)*: a, b* – typical film element; *c, d* – optimized film element for large and small attenuations, respectively (dotted line – $\alpha = 17 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$, solid line – $\alpha = 10^{-3}\ °C^{-1}$)

Заключение. Предложенная методика может быть использована для определения максимальной мощности входного импульсного сигнала в наихудшем случае (короткий импульс малой длительности при большой скважности) по наивысшей мгновенной допустимой температуре перегрева резистивной пленки.

Литература

1. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ: монография. Кн. 1 / под ред. ***А. Г. Гудкова, В. В. Попова***. М.: Автотест, 2012. 212 с. EDN: QMXFQR.

2. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ: монография. Кн. 2 / под ред. ***А. Г. Гудкова, В. В. Попова***. М.: Автотест, 2013. 214 с. EDN: ZGAZNZ.

3. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ: монография. Кн. 3 / под ред. ***В. Н. Вьюгинова, А. Г. Гудкова, В. В. Попова***. М.: Вираж-Центр, 2016. 252 с. EDN: ZGCZOH.

4. ***Горбачев В., Кочемасов В.*** Резисторы – основные типы и характеристики. Ч. 4 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2021. № 8 (209). С. 102–113. https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.209.8.102.113. – EDN: BVAALV.

5. ***Крючатов В. И., Карамов Ф. А.*** Конструктивно-технологические вопросы проектирования тонкопленочных резистивных нагрузок ГИС СВЧ диапазона при воздействии импульсной СВЧ мощности // Электронное приборостроение: науч.-практ. сб. Вып. 5 (26). Казань: Отечество, 2002. С. 108–116.

6. ***Корж И. А., Кузнецов А. Н.*** Исследование резистивных пленок TaN с минимальным ТКС для мощных ВЧ нагрузок и аттенюаторов // Техника радиосвязи. 2017. № 4 (35). С. 117–124. EDN: BTPDJY.

7. ***Корж И. А., Кузнецов А. Н.*** Тонкие резистивные пленки на основе соединений тантала для изготовления мощных ВЧ-нагрузок и аттенюаторов // Техника радиосвязи. 2016. № 4 (31). С. 69−76. EDN: YGARVB.

8. ***Гладких М. В., Моин И. И.*** Мощная широкополосная нагрузка на поликристаллическом алмазе // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА: материалы науч.-техн. конф. (Владимир, 21–23 марта 2007 г.). Ч. 1. Владимир: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2007. С. 33–34.

9. ***Корж И. А., Зима В. Н., Евдокимов М. А.*** Мощные пленочные резисторы на подложках из AlN и Al_2O_3 для ВЧ аттенюаторов большой мощности // Радиотехника, электроника и связь («РЭиС-2011»): сб. докладов Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 5–8 июля 2011 г.). Омск: ОНИИП, 2011. С. 478–484. EDN: TXVZNN.

10. ***Пилькевич А. В., Садков В. Д.*** Изменение параметров пленочных поглощающих элементов под действием импульсной мощности // Программа и аннотации докладов XXIX Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные системы и технологии – ИСТ-2023» (г. Н. Новгород, 29 мая – 2 июня 2023 г.). Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2023. С. 33.

11. Двухслойные теплоотводящие диэлектрические подложки алмаз – нитрид алюминия / ***В. Г. Ральченко, А. В. Савельев, А. Ф. Попович и др.*** // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 4. С. 243–247. EDN: HUIIOH.

12. Потенциал отечественного алмаза. Теплоотводы / ***А. Колядин, В. Лучинин, Ю. Ягудаев и др.*** // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 5 (216). С. 50–61. https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.216.5.50.61. – EDN: KAHAKL.

13. ***Подшибякин С. В.*** Композиционные керметные резистивные, проводниковые и защитные материалы для толстопленочных резисторов // Электронная промышленность. 2008. № 4. С. 46–56. EDN: JXFZAR.

14. ***Подвигалкин В. Я.*** Возможности толстых пленок микроэлектроники в создании элементной базы радиоэлектронных систем (обзор) // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 5. С. 348–360. https://doi.org/10.7868/S0544126913050062. – EDN: QYNIFD.

15. ***Богомолов П. Г.*** Методы расширения полосы рабочих частот пленочных СВЧ-аттенюаторов // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 145–148. EDN: VPYVSF.

16. ***Давидович М. В., Мещанов В. П., Никулина А. С., Попова Н. Ф.*** Электродинамическое моделирование неоднородных линий с потерями: расчет нагрузок и аттенюаторов // Электронная промышленность. 2000. № 1. С. 73−83.

17. ***Садков В. Д., Горячев Ю. А.*** Расчет тонкопленочной аттенюаторной пластины // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. 1977. № 2. С. 13–19.

18. ***Пилькевич А. В., Фомина К. С., Садков В. Д.*** Оптимизация топологии пленочных поглощающих элементов ВЧ и СВЧ аттенюаторов // Проектирование и технология электронных средств. 2020. № 1. С. 8–12. EDN: WTBBEU.

19. ***Фомина К. С., Пилькевич А. В., Садков В. Д.*** Оптимизация топологии пленочных чип-элементов ВЧ и СВЧ аттенюаторов // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. № 9. С. 540–545. https://doi.org/10.17587/nmst.21.540-545. – EDN: WGRAEQ.

20. ELCUT: Программа моделирования электромагнитных и температурных полей // ELCUT [Электронный ресурс] / ООО «Тор», С.-Петербург. URL: https://elcut.ru/about_r.htm (дата обращения: 26.01.2024).

21. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. ***К. П. Мищенко, А. А. Равделя***. 7-е изд., испр. Л.: Химия, 1974. 200 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 07.09.2023 г.;
принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Пилькевич Антон Владимирович – аспирант Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), anton-pi@yandex.ru

Садков Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), sadvd2016@mail.ru

References

1. *Improving the reliability and quality of microwave hybrid IC and monolithic IC,* monograph. Book 1, eds A. G. Gudkov, V. V. Popov. Moscow, Avtotest Publ., 2012. 212 p. (In Russian). EDN: QMXFQR.

2. *Improving the reliability and quality of microwave hybrid IC and monolithic IC,* monograph. Book 2, eds A. G. Gudkov, V. V. Popov. Moscow, Avtotest Publ., 2013. 214 p. (In Russian). EDN: ZGAZNZ.

3. *Improving the reliability and quality of microwave hybrid IC and monolithic IC,* monograph. Book 3, eds V. N. V'yuginov, A. G. Gudkov, V. V. Popov. Moscow, Virazh-Tsentr Publ., 2016. 252 p. (In Russian). EDN: ZGCZOH.

4. Gorbachev V., Kochemasov V. Resistors – basic types and characteristics. Part 4. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business,* 2021, no. 8 (209), pp. 102–113. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.209.8.102.113. – EDN: BVAALV.

5. Kryuchatov V. I., Karamov F. A. Structural and technological issues of designing thin-film resistive loads of microwave range HIC on exposure to pulsed microwave power. *Elektronnoe priborostroenie,* research-to-practice collection. Iss. 5 (26). Kazan, Otechestvo Publ., 2002, pp. 108–116. (In Russian).

6. Korzh I. A., Kuznetsov A. N. The research of TaN resistive films with a minimum TCR for powerful RF loads and attenuators. *Tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Technology,* 2017, no. 4 (35), pp. 117–124. (In Russian). EDN: BTPDJY.

7. Korzh I. A., Kuznetsov A. N. Thin resistive films based on tantalum compounds for manufacturing powerful RF loads and attenuators. *Tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Technology,* 2016, no. 4 (31), pp. 69–76. (In Russian). EDN: YGARVB.

8. Gladkikh M. V., Moin I. I. Powerful broadband load on polycrystalline diamond. *Tverdotel'naya elektronika, slozhnye funktsional'nye bloki REA,* research-to-practice conference proceedings (Vladimir, 21–23 Mar. 2007). Pt. 1. Vladimir, MNTORES im. A. S. Popova Publ., 2007, pp. 33–34. (In Russian).

9. Korzh I. A., Zima V. N., Evdokimov M. A. Powerful film resistors on AlN and Al_2O_3 substrates for HF high-power attenuators. *Radiotekhnika, elektronika i svyaz' ("REiS-2011"),* proceedings of International sci.-tech. conference (Omsk, 5–8 July 2011). Omsk, Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, 2011, pp. 478–484. (In Russian). EDN: TXVZNN.

10. Pilkevich A. V., Sadkov V. D. Changing the parameters of film absorbing elements under the action of pulsed power. *Program and annotations of reports XXIX International Scientific and Technical Conference "Information Systems and Technologies – IST-2023"* (Nizhny Novgorod, May 29 – June 2, 2023). Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical. R. E. Alekseev University, 2023, p. 33.

11. Ralchenko V. G., Saveliev A. V., Popovich A. F., Vlasov I. I., Voronina S. V., Ashkinazi E. E. CVD diamond coating of AlN ceramic substrates to enhance heat removal. *Russ. Microel.,* 2006, vol. 35, iss. 4, pp. 205–209. https://doi.org/10.1134/S1063739706040019

12. Kolyadin A., Luchinin V., Yagudaev Yu., Bokhov O., Ilyin S., Klepikov I., Nozhkina A. Potential of domestic diamond. Heat sinks. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business,* 2022, no. 5 (216), pp. 50–61. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.216.5.50.61. – EDN: KAHAKL.

13. Podshibyakin S.V. Composite cermet resistive, conductive and protective materials for thick-film resistors. *Elektronnaya promyshlennost',* 2008, no. 4, pp. 46–56. (In Russian). EDN: JXFZAR.

14. Podvigalkin V. Ya. Possibilities of thick microelectronics films in creating the element base of radioelectronic systems (review). *Mikroelektronika,* 2013, vol. 42, no. 5, pp. 348–360. (In Russian). https://doi.org/10.7868/S0544126913050062. – EDN: QYNIFD.

15. Bogomolov P. G. Extension methods operating frequency band film microwave attenuators. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki = Achievements of Modern Radio Electronics*, 2015, no. 10, pp. 145–148. (In Russian). EDN: VPYVSF.

16. Davidovich M. V., Meshchanov V. P., Nikulina A. S., Popova N. F. Electrodynamic modeling of inhomogeneous lines with losses: Calculation of loads and attenuators. *Elektronnaya promyshlennost',* 2000, no. 1, pp. 73–83. (In Russian).

17. Sadkov V. D., Goryachev Yu. A. Calculation of thin-film attenuator plate. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. Radioizmeritel'naya tekhnika,* 1977, no. 2, pp. 13–19. (In Russian).

18. Pilkevich A. V., Fomina K. S., Sadkov V. D. Optimization of topology of the film absorbing elements HF and very high frequency of attenuators. *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2020, no. 1, pp. 8–12. (In Russian). EDN: WTBBEU.

19. Fomina K. S., Pilkevich A. V., Sadkov V. D. Optimization of the topology of the film chip elements of high frequency and microwave attenuators. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystem Technology*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 540–545. (In Russian). https://doi.org/10.17587/nmst.21.540-545. – EDN: WGRAEQ.

20. ELCUT: electromagnetic and thermal field simulation software. *ELCUT by OOO "Tor", St. Petersburg.* Available at: https://elcut.ru/about_r.htm (accessed: 26.01.2024).

21. *Brief reference of physical and chemical quantities,* eds K. P. Mishchenko, A. A. Ravdel. 7th ed., rev. Leningrad, Khimiya Publ., 1974. 200 p. (In Russian).

The article was submitted 08.06.2023; approved after reviewing 07.09.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Anton V. Pilkevich – PhD student of the Institute of Radio Engineering and Information Technologies, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev (Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Minin st., 24), anton-pi@yandex.ru

Viktor D. Sadkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Radio Engineering and Information Technologies, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev (Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Minin st., 24), sadvd2016@mail.ru

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS
Vol. 52, *No.* 7, 2023. – ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи
журнала «Известия вузов. Электроника».

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

Научная статья
УДК 621.3.049.771.14:621.3.062
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-185-193
EDN: NTQOYY

Деревья обратного прохода на смешанном коммутационном графе для ускоренной трассировки ПЛИС

А. Ю. Чистяков, М. А. Заплетина

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

zapletina_mariya@mail.ru

Аннотация. Одно из преимуществ проектирования на ПЛИС по сравнению с заказными интегральными схемами и базовыми матричными кристаллами – быстрая физическая реализация требуемой функциональности на кристалле. Однако попытки улучшения итоговых характеристик проектируемых схем в большинстве случаев приводят к увеличению времени проектирования. В связи с этим создание эффективных средств автоматизированного проектирования для современных микросхем класса ПЛИС, учитывающих данные аспекты, имеет важное значение. В работе предложен подход к ускорению этапа трассировки в рамках маршрута топологического проектирования на ПЛИС за счет модификации базового алгоритма трассировки Pathfinder, адаптированного к смешанному графу трассировочных ресурсов. Модификация заключается в построении и использовании структур деревьев обратного прохода, позволяющих реализовать направленный поиск на смешанном графе без информации о геометрических координатах его элементов. Для тестирования нового алгоритма использованы наборы схем LGSynth’89, IWLS’2005 и ряд проектов с сайта opencores.org. Работа алгоритма проанализирована на примере четырех ПЛИС. Согласно анализу результатов вычислительных экспериментов, улучшенный алгоритм продемонстрировал уменьшение времени трассировки в среднем от 1,8 до 3,6 раза в зависимости от целевой ПЛИС.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, система автоматизации проектирования, топологическое проектирование, физический синтез, трассировка, Pathfinder, поиск кратчайшего пути, направленный поиск

Для цитирования: Чистяков А. Ю., Заплетина М. А. Деревья обратного прохода на смешанном коммутационном графе для ускоренной трассировки ПЛИС // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 185–193. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-185-193. – EDN: NTQOYY.

© А. Ю. Чистяков, М. А. Заплетина, 2024

Original article

Backpass trees on a mixed route graph for accelerated FPGA routing

A. Yu. Chistiakov, M. A. Zapletina

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

zapletina_mariya@mail.ru

Abstract. One of the main advantages of FPGA design flow compared with ASICs and gate arrays is the required functionality implementation speed. However, their weakness is the final circuit, and attempts to improve them lead to an increase in the design flow time in most cases. Therefore, effective computer-aided design tools for modern FPGA that consider both these aspects are very essential. This work proposes an approach to accelerate the routing stage in FPGA design flow by modification of a basic routing algorithm Pathfinder adapted to a mixed route graph. The modification is to create and use backpass tree structures that allow the implementation of a directed path search on a mixed route graph having no information about geometric coordinates of its elements. Benchmark sets used for testing are LGSynth'89, IWLS'2005, and a range of projects from opencores.org. The work of the algorithm was analyzed using four FPGA architectures. According to the analysis of experimental results the modified algorithm has demonstrated an average routing runtime reduction of 1.8 to 3.6 depending on the target FPGA.

Keywords: field-programmable gate array, computer-aided design, topological layout design, physical synthesis, place and route, PnR, routing, Pathfinder, shortest path search, directed path search

For citation: Chistiakov A. Yu., Zapletina M. A. Backpass trees on a mixed route graph for accelerated FPGA routing. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 185–193. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-185-193. – EDN: NTQOYY.

Введение. Трассировка – один из важнейших этапов маршрута проектирования в базисе ПЛИС. При традиционном подходе, без применения этапа ECO (Engineering Change Order – указание о внесении изменений), качество трассировочного решения для межсоединений определяет окончательные временные и другие характеристики проектируемой схемы, например потребляемую мощность. Со снижением технологических норм изготовления кристаллов ПЛИС увеличивается доля их площади, занимаемая трассировочными ресурсами, а вместе с ней и время, необходимое для поиска трассировочного решения, удовлетворяющего заданным критериям качества. В связи с этим возникает необходимость разработки методов и алгоритмов для решения задач этапа трассировки, обеспечивающих баланс между качеством результатов этого этапа и временными затратами.

Цель настоящей работы – модификация и анализ эффективности алгоритма Pathfinder, предназначенного для применения на смешанном графе коммутационных ресурсов.

Алгоритмы для решения задач этапа трассировки. Один из известных алгоритмов трассировки схем в базисе ПЛИС, часто используемый в открытых и коммерческих

САПР, – Pathfinder [1]. Это итерационный алгоритм, в котором последовательно для всех проектных цепей на графе $G(V, E)$ представления коммутационных ресурсов ПЛИС строятся деревья трассировки, связывающие вершины-контакты каждой из проектных цепей. Элементы множества V представляют собой фрагменты металлизации коммутационных ресурсов ПЛИС, элементы множества E – программируемые трассировочные элементы, которыми они могут быть скоммутированы. На начальных итерациях алгоритма одни и те же коммутационные ресурсы могут быть использованы одновременно несколькими деревьями трассировки. Такие трассировочные ресурсы и соответствующие проектные цепи называются перегруженными. В ходе последующих итераций все или только перегруженные цепи подвергаются разрыву и перетрассировке, т. е. полной очистке и повторному построению их трассировочных деревьев с учетом истории изменения перегруженности [2]. Работа алгоритма завершается, когда перегруженность полностью устранена или проектные цепи не могут быть трассированы из-за недостатка коммутационных ресурсов.

Выбор очередной вершины и ребра коммутационного графа при построении текущего дерева трассировки определяется с помощью оценочной функции:

$$c_n = (b_n + h_n) \cdot p_n, \quad (1)$$

где b_n – базовый вес вершины графа G; h_n – параметр, отражающий перегруженность данного узла на более ранних итерациях; p_n – параметр, пропорциональный количеству проектных цепей, проходящих через узел на текущей итерации алгоритма.

С физической точки зрения оправданным является использование в качестве b_n задержки прохождения сигнала через рассматриваемый трассировочный элемент.

В работе [3] представлен алгоритм трассировки CRoute для улучшения временных характеристик проектируемых схем. CRoute основывается на алгоритме Pathfinder с применением стратегии направленного поиска. Алгоритм CRoute более быстрый (в среднем в 3,4 раза) по сравнению с версией Pathfinder, используемой в открытой САПР VPR 7.0 [4]. При расчете стоимости трассировочного элемента в работе [3] предлагается учитывать расстояние от него до геометрического центра трассируемой цепи, а оценочную стоимость прохождения пути от текущего узла до приемника – рассчитывать в зависимости от манхэттенского расстояния и средней стоимости рассматриваемого сегмента коммутационных ресурсов. Улучшение временных характеристик, в частности повышение частоты работы проектируемой схемы на 6 %, достигнуто в результате изменения функции оценки стоимости вершины и пути от нее до приемника рассматриваемой цепи за счет введения параметра критичности вершины и задержки на ней, обусловленной внутренними сопротивлением и емкостью ведущего к ней коммутационного элемента.

В алгоритме FCRoute [5] в отличие от классического Pathfinder имеется специальный механизм распределения приоритетов трассировочных ресурсов и осуществляется замена точного расчета оценочного веса вершин графа G с низким приоритетом на приближенный. По результатам вычислительных экспериментов алгоритм FCRoute позволил уменьшить время трассировки на 58 и 49 % по сравнению с алгоритмами RORA [6] и AIR [7] соответственно практически без влияния на задержку критического пути и суммарную длину соединений.

Алгоритм RORA [6] базируется на введении в Pathfinder VPR 7.0 [4] специальной стратегии перетрассировки с оптимизацией временных характеристик. В рамках этой стратегии перетрассировке подлежат не все соединения, а только те, которые удовлетворяют заданным временным ограничениям или используют перегруженные трассировочные ресурсы. Построение трассировочного дерева ограничено правилами, соглас-

но которым аналогично [2, 7] поиск пути на графе осуществляется в направлении приемника цепи. По сравнению с алгоритмом трассировки VPR 7.0 алгоритм RORA показал улучшение времени трассировки на 68,5 %. Время задержки критического пути и длина межсоединений улучшились незначительно (менее 3 %).

Таким образом, применение направленного поиска для модификации алгоритма Pathfinder [1] дает положительные результаты. Однако прямое использование алгоритмов трассировки, рассмотренных в работах [3–7], для случая ПЛИС [8–11] затруднено. Это вызвано недостаточностью инструментов описания коммутационной архитектуры в САПР VPR для учета детальных особенностей данных схем ПЛИС, а также недоступностью исходного кода, за исключением CRoute, для интеграции проанализированных алгоритмов в САПР для ПЛИС [8–11].

Модификация алгоритма Pathfinder на основе деревьев обратного прохода. Базовая идея предлагаемой модификации алгоритма Pathfinder [2] состоит в построении набора структур, которые называются деревом обратного прохода (ДОП), и изменении оценочной функции (1) для учета принадлежности рассматриваемой вершины к набору ДОП трассируемой цепи. После инициализации набора ДОП начинается этап построения трассировочных деревьев для каждой проектной цепи. Алгоритм трассировки проходит от источника цепи и добавляет в трассировочное дерево соседние деревья с текущей вершины, которые имеют минимальную стоимость, вычисленную по модифицированной формуле

$$c_i = (b_i + h_i)\,p_i + \alpha s_i, \qquad (2)$$

где α – коэффициент, регулирующий влияние ДОП на процесс трассировки; s_i – шаг рассматриваемой вершины v_i в ДОП текущей проектной цепи. Если вершина не является частью набора ДОП текущей проектной цепи, шаг s_i равен максимальной высоте ДОП.

Структура ДОП представляет собой дерево на взвешенном смешанном коммутационном графе, строящееся по направлению от приемника проектной цепи к ее источнику на определенную глубину, заданную заранее. Наилучшее значение высоты ДОП определяется эмпирически для каждой ПЛИС. Каждой вершине графа трассировки, вошедшей в ДОП, присваивается целое число шагов, равное кратчайшему расстоянию от нее до приемника, измеряемому в количестве пройденных трассировочных элементов. Для вершины приемника это число равно нулю.

Меньшая величина шага означает меньшую стоимость соответствующего трассировочного элемента в модифицированной формуле (2). Чем она меньше, тем предпочтительнее проектная цепь будет трассирована с использованием данного элемента. Стоимость элемента, находящегося в ДОП, всегда меньше, чем стоимость элемента, не относящегося к нему. Шаг элемента дерева обратного прохода показывает, насколько близко он находится к ближайшему приемнику проектной цепи. В данном методе используется мультитерминальное представление проектных цепей с одним источником и несколькими приемниками, аналогичное оригинальному алгоритму Pathfinder [1].

Для каждой проектной цепи строится набор ДОП по числу ее приемников. На рис. 1, *а* показана цепь $n_i = \{S, \{T1, T2\}\}$, где S – вершина смешанного коммутационного графа, соответствующая терминалу-источнику цепи; $\{T1, T2\}$ – вершины-приемники цепи n_i. Поскольку цепь содержит два приемника, набор ДОП высотой $h = 2$ строится в два этапа: от вершины $T1$ (рис. 1, *б*) и вершины $T2$ (рис. 1, *в*). Если при построении дерева вершина v_i оказывается к текущему приемнику ближе, чем к предыдущим, ее шаг $s(v_i)$ обновляется на меньший (см. рис. 1, *в*, заштрихованная вершина).

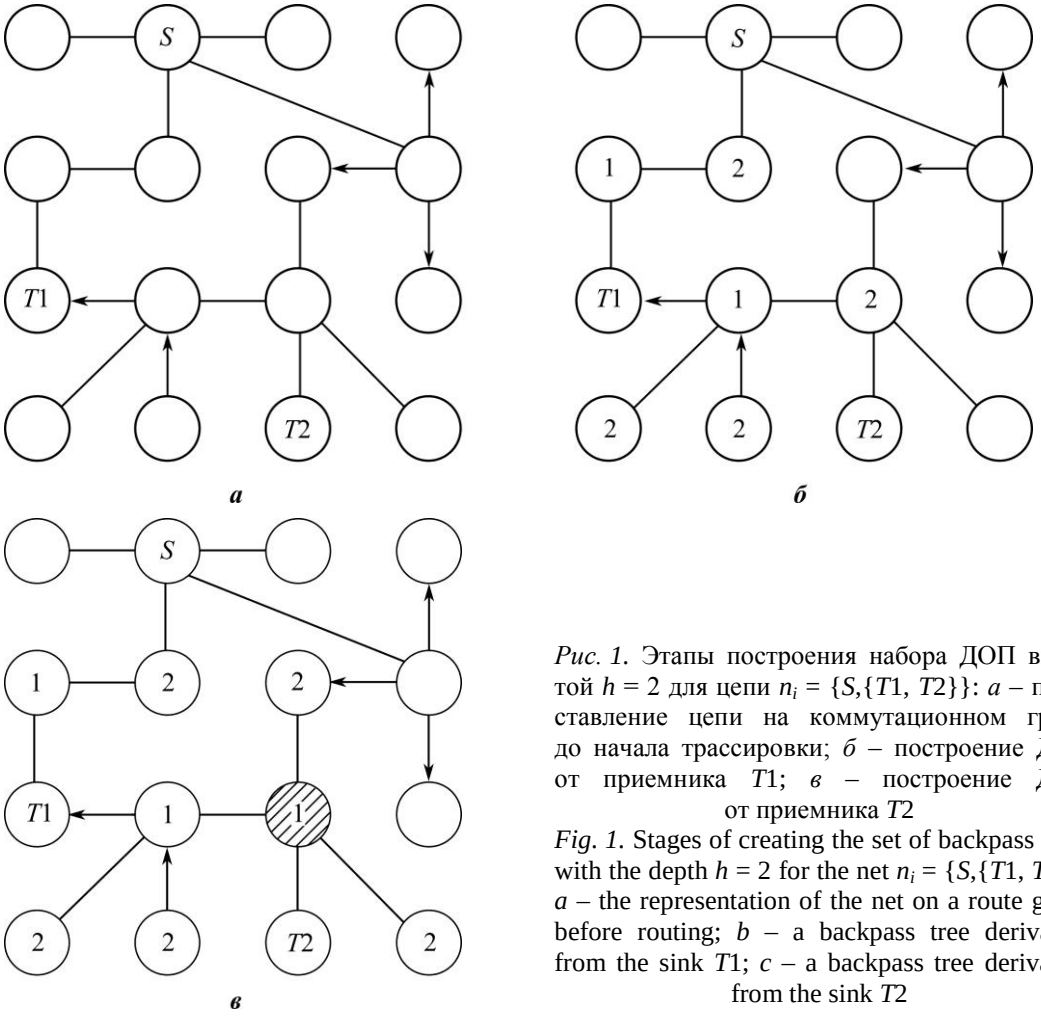


Рис. 1. Этапы построения набора ДОП высотой $h = 2$ для цепи $n_i = \{S,\{T1, T2\}\}$: *а* – представление цепи на коммутационном графе до начала трассировки; *б* – построение ДОП от приемника *T*1; *в* – построение ДОП от приемника *T*2

Fig. 1. Stages of creating the set of backpass trees with the depth $h = 2$ for the net $n_i = \{S,\{T1, T2\}\}$: *a* – the representation of the net on a route graph before routing; *b* – a backpass tree derivation from the sink *T*1; *c* – a backpass tree derivation from the sink *T*2

Для хранения элементов, относящихся к набору ДОП проектной цепи n_i, используются структуры данных, которые называются деревьями Адельсон-Вельского – Ландиса (АВЛ-деревья) [12]: $AVL(n_i) = \{a_j\}$, где $a_j = \langle v_j, e_j, s(v_j) \rangle$ – упорядоченная тройка вершины ведущего к ней ребра на коммутационном графе и шага вершины: $v_j \in V^{AVL}(n_i)$, $e_j \in E^{AVL}(n_i)$, $V^{AVL}(n_i) \subset V$, $E^{AVL}(n_i) \subset E$, причем элементы a_j уникальны и $\forall v_j \in V^{AVL}(n_i)$: $\text{у}v_k = v_j$; $\forall e_j \in E^{AVL}(n_i)$: $\text{у}e_k = e_j$.

АВЛ-дерево – это сбалансированное двоичное дерево поиска, высоты поддеревьев которого различаются не более чем на единицу. Элементы, имеющие значение ключа большее, чем у корневого элемента любого поддерева, хранятся в его правом поддереве, а имеющие меньшее значение – в левом. Ключом поиска является уникальный индекс трассировочного элемента, поэтому само значение шага элемента под конкретным индексом не влияет на его расположение в АВЛ-дереве. Трассировочные элементы могут добавляться в дерево в любой последовательности. Связи в АВЛ-деревьях не отражают взаимосвязи соответствующих элементов коммутационного графа. Использование АВЛ-деревьев обусловлено меньшей алгоритмической сложностью операции поиска элемента по сравнению со сложностью поиска в несортированном массиве ($O(\log_2 N)$ и $O(N)$ соответственно).

Максимальная глубина построения ДОП h оказывает двойное влияние на скорость трассировки. С одной стороны, с ростом h алгоритм трассировки раньше находит элементы, принадлежащие ДОП, и, соответственно, быстрее активирует направленный поиск пути до приемника. С другой стороны, выбор большого значения h ведет к увеличению времени построения набора ДОП для каждой проектной цепи и поиска нужного элемента в них, тем самым увеличивается общее время трассировки. В алгоритме имеется флаг принадлежности вершины графа G какому-либо ДОП, что позволяет ограничить поиск трассировочного решения областью, ближайшей к приемникам, а также не выполнять поиск вхождения отсутствующей вершины в набор ДОП.

Зависимость скорости трассировки от коэффициента α следующая: если значение α слишком мало, ДОП не оказывают практически никакого влияния на процесс трассировки и ее скорость сравнима с оригинальным алгоритмом Pathfinder. Напротив, если значение α достаточно велико, то алгоритм использует только элементы, принадлежащие набору ДОП. При возникновении перегруженности в данных элементах требуется большее количество итераций и времени для ее устранения.

Вычислительные эксперименты. Влияние предложенной модификации оценочной функции алгоритма Pathfinder оценено на примере трассировки тестовых СБИС в базисе четырех реконфигурируемых интегральных схем:

– программируемый цифровой блок ПЛИС в составе ПАЦИС 5400ТР094 [8] – 1794 программируемых логических ячейки 3-LUT + Trigger (АО «Дизайн Центр “Союз”», г. Москва, г. Зеленоград);

– блок программируемой логики микросхемы 1931ВА018 – 3200 программируемых логических ячеек 4-LUT + Trigger [9] (ПАО «Микрон», г. Москва, г. Зеленоград);

– ПЛИС 5510ХС3АТ – 3200 программируемых логических ячеек 4-LUT + Trigger) [10] (ПАО «Микрон»);

– ПЛИС в составе системы на кристалле 5510ТС028 – 17 920 трехвходовых программируемых логических ячеек типа VersaTile) [11] (АО «НИИМЭ», г. Москва, г. Зеленоград).

На рис. 2 представлены результаты применения предложенного метода трассировки на примере тестовых схем с заполнением логической части базовой реконфигурируемой ИС от 8 до 72 %. Штриховая горизонтальная линия – среднее значение ускорения трассировки. При построении ДОП использованы следующие параметры: h = 4, α = 0,5 для ПЛИС [8]; h = 9, α = 0,05, кроме схемы *aes_sbox* с сайта opencores.org (h = 9, α = 0,02) для ПЛИС [9]; h = 9, α = 0,05 для ПЛИС [10]; h = 6, α = 0,5 для ПЛИС [11].

На большинстве тестовых схем (73 % от всей тестовой выборки) введенная модификация оценочной функции приводит к более чем двухкратному уменьшению длительности трассировки. Так, для базовой ПЛИС [8] оно составляет в среднем 38 % (1,81 раза); ПЛИС [9] – 61 % (3,11 раза); ПЛИС [10] – 60 % (2,97 раза); ПЛИС [11] – 68 % (3,56 раза). Согласно рис. 3 предложенный метод замедлил трассировку только в 2,7 % случаев, т. е. на семи тестовых схемах из 260. Таблица контрольных точек имеет следующий вид:

Ускорение, %	0	≥ 0	≥ 20	≥ 30	≥ 40	≥ 50
Доля от всей тестовой выборки (260 схем), %	2,7	97,3	91,5	88,1	83,1	72,7

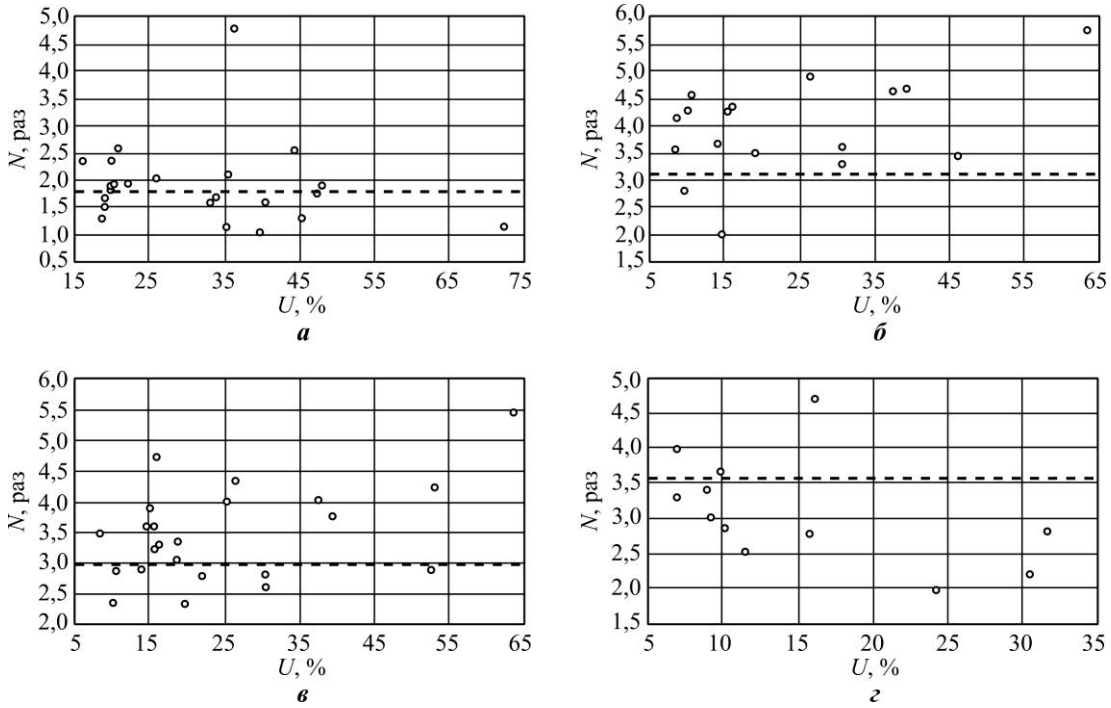


Рис. 2. Результаты тестирования предложенного метода трассировки на примере четырех ПЛИС: *а* – [8]; *б* – [9]; *в* – [10]; *г* – [11] (*N* – уменьшение длительности трассировки относительно алгоритма [2]; *U* – доля заполнения логического объема ПЛИС; штриховая горизонтальная линия – среднее значение трассировки)

Fig. 2. Test results of the proposed routing method on four FPGAs: *a* – [8]; *b* – [9]; *c* – [10]; *d* – [11] (*N* – the reduction in the routing duration relative to the algorithm [2]; *U* – the utilization percentage for the FPGA logic; the dashed horizontal line – the average value of the trace)

Доля времени построения набора ДОП от общего времени трассировки в среднем составила 0,3 % для схемы ПЛИС [8]; 1,5 % – ПЛИС [9]; 3,1 % – ПЛИС [10]; 2 % – ПЛИС [11].

Наибольшее влияние на итоговые характеристики схем предложенный метод трассировки оказал в случае ПЛИС с архитектурой островного типа [8]: количество используемых трассировочных элементов в среднем увеличилось на 10,7 %, задержка критического пути – на 21,6 %. Наименее чувствительными к примененному методу оказались итоговые характеристики схем, реализованных на ПЛИС [10], – в среднем 2,5 и 1,2 % соответственно. Для архитектур ПЛИС [9] и [11] среднее изменение количества используемых трассировочных ресурсов составляет 9,4 и 2,8 %, среднее изменение задержки критического пути – 2,9 и 9 % соответственно.

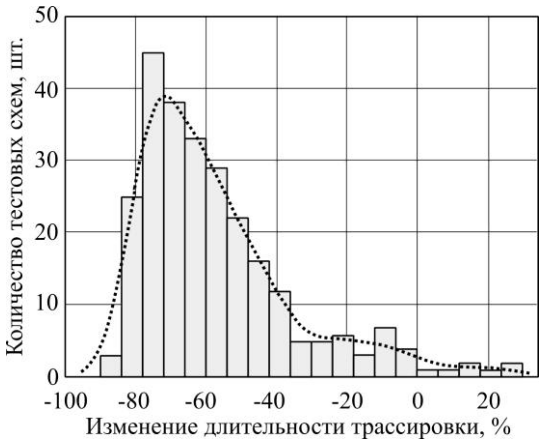


Рис. 3. Распределение количества тестовых схем в зависимости от полученного ускорения трассировки относительно исходного алгоритма [2] (гистограмма с наложенной кривой аппроксимации по методу KDE [13])

Fig. 3. Distribution of testing circuits depending on the achieved routing acceleration compared with the original algorithm [2] (a histogram with density estimation graph obtained by KDE method [13])

Заключение. В результате проведенных экспериментов модифицированный алгоритм, протестированный на цифровых схемах из наборов LGSynth'89, IWLS'2005 и ряде проектов сайта opencores.org, показал уменьшение времени трассировки в среднем от 1,8 до 3,6 раза в зависимости от используемой ПЛИС. В большинстве случаев (более 68 % тестовых схем) он не оказал отрицательного влияния на временные характеристики разрабатываемых схем.

Литература

1. ***McMurchie L., Ebeling C.*** PathFinder: A negotiation-based performance-driven router for FPGAs // 3rd International ACM Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. Napa Valley, CA: IEEE, 1995. P. 111–117. https://doi.org/10.1109/FPGA.1995.242049

2. ***Zapletina M. A., Zheleznikov D. A.*** The acceleration techniques for the modified pathfinder routing algorithm on an island-style FPGA // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg: IEEE, 2022. P. 920–923. https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755536

3. ***Vercruyce D., Vansteenkiste E., Stroobandt D.*** CRoute: A fast high-quality timing-driven connection-based FPGA router // 2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). San Diego, CA: IEEE, 2019. P. 53–60. https://doi.org/10.1109/FCCM.2019.00017

4. VTR 7.0: Next generation architecture and CAD system for FPGAs / ***J. Luu, J. Goeders, M. Wainberg et al.*** // ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst. 2014. Vol. 7. Iss. 2. Art. No. 6. https://doi.org/10.1145/2617593

5. FCRoute: A fast FPGA connection router using soft routing-space pruning algorithm / ***D. Wang, J. Feng, W. Zhou et al.*** // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2023. Vol. 42. No. 3. P. 887–899. https://doi.org/10.1109/TCAD.2022.3188964

6. A runtime optimization approach for FPGA routing / ***D. Wang, Z. Duan, C. Tian et al.*** // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2018. Vol. 37. No. 8. P. 1706–1710. https://doi.org/10.1109/TCAD.2017.2768416

7. ***Murray K. E., Zhong S., Betz V.*** AIR: A fast but lazy timing-driven FPGA router // 2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). Beijing: IEEE, 2020. P. 338–344. https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045175

8. 5400ТР094 ПАЦИС: Программируемая аналого-цифровая интегральная схема // Дизайн-центр «Союз» [Электронный ресурс]. URL: https://dcsoyuz.ru/products/pais/art/1605 (дата обращения: 20.11.2023).

9. Контракт: 1770559633917000451 // ГосЗатраты [Электронный ресурс]. URL: https://clearspending.ru/contract/1770559633917000451/ (дата обращения: 20.11.2023).

10. 5510ХС1Т/2Т/3Т: ПЛИС емкостью 20, 50 и 100 тыс. вентилей // Микросхемы ПАО «Микрон» [Электронный ресурс]. М., 2020. С. 31. URL: https://413100.selcdn.ru/upload-153a6b408c99eadfc8d7d3c5576481d8/iblock/05d/05d7224966d072bbbc986716f3e32ecc/katalog+VPK_2020.pdf (дата обращения: 20.11.2023).

11. Контракт: 1770559633917000449 // ГосЗатраты [Электронный ресурс]. URL: https://clearspending.ru/contract/1770559633917000449/#suppliers (дата обращения: 20.11.2023).

12. ***Адельсон-Вельский Г. М., Ландис Е. М.*** Один алгоритм организации информации // Доклады АН СССР. 1962. Т. 146. № 2. С. 263—266.

13. ***Wand M. P., Jones M. C.*** Kernel smoothing. Boca Raton, FL; London: Chapman & Hall/CRC, 1995. 226 p.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.09.2023 г.; принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Чистяков Александр Юрьевич – инженер-исследователь отдела систем автоматизированного проектирования интегральных схем Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), chis.alexandr2018@yandex.ru

Заплетина Мария Андреевна – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела систем автоматизированного проектирования интегральных схем Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), zapletina_mariya@mail.ru

References

1. McMurchie L., Ebeling C. PathFinder: A negotiation-based performance-driven router for FPGAs. *3rd International ACM Symposium on Field-Programmable Gate Arrays.* Napa Valley, CA, IEEE, 1995, pp. 111–117. https://doi.org/10.1109/FPGA.1995.242049

2. Zapletina M. A., Zheleznikov D. A. The acceleration techniques for the modified pathfinder routing algorithm on an island-style FPGA. *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).* St. Petersburg, IEEE, 2022, pp. 920–923. https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755536

3. Vercruyce D., Vansteenkiste E., Stroobandt D. CRoute: A fast high-quality timing-driven connection-based FPGA router. *2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM).* San Diego, CA, IEEE, 2019, pp. 53–60. https://doi.org/10.1109/FCCM.2019.00017

4. Luu J., Goeders J., Wainberg M., Somerville A., Yu T., Nasartschuk K., Nasr M., Wang S. et al. VTR 7.0: Next generation architecture and CAD system for FPGAs. *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.*, 2014, vol. 7, iss. 2, art. no. 6. https://doi.org/10.1145/2617593

5. Wang D., Feng J., Zhou W., Hao X., Zhang X. FCRoute: A fast FPGA connection router using soft routing-space pruning algorithm. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,* 2023, vol. 42, no. 3, pp. 887–899. https://doi.org/10.1109/TCAD.2022.3188964

6. Wang D., Duan Z., Tian C., Huang B., Zhang N. A runtime optimization approach for FPGA routing. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,* 2018, vol. 37, no. 8, pp. 1706–1710. https://doi.org/10.1109/TCAD.2017.2768416

7. Murray K. E., Zhong S., Betz V. AIR: A fast but lazy timing-driven FPGA router. *2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC).* Beijing, IEEE, 2020, pp. 338–344. https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045175

8. 5400TP094 PATsIS: programmable analog-digital integrated circuit. *Dizayn-tsentr "Soyuz".* (In Russian). Available at: https://dcsoyuz.ru/products/pais/art/1605 (accessed: 20.11.2023).

9. Contract: 1770559633917000451. *ClearSpending.* (In Russian). Available at: https://clearspending.ru/contract/1770559633917000451/ (accessed: 20.11.2023).

10. 5510XC1T/2T/3T: FPGA with a capacity of 20, 50 and 100 thousand gates. *Mikroskhemy PAO "Mikron".* Moscow, 2020, p. 31. (In Russian). Available at: https://413100.selcdn.ru/upload-153a6b408c99eadfc8d7d3c5576481d8/iblock/05d/05d7224966d072bbbc986716f3e32ecc/katalog+VPK_2020.pdf (accessed: 20.11.2023).

11. Contract: 1770559633917000449. *ClearSpending.* (In Russian). Available at: https://clearspending.ru/contract/1770559633917000449/#suppliers (accessed: 20.11.2023).

12. Adel'son-Vel'skii G. M., Landis E. M. An algorithm for organization of information. *Dokl. Akad. Nauk SSSR,* 1962, vol. 146, no. 2, pp. 263—266. (In Russian).

13. Wand M. P., Jones M. C. *Kernel smoothing.* Boca Raton, FL, London, Chapman & Hall/CRC, 1995. 226 p.

The article was submitted 08.06.2023; approved after reviewing 15.09.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Alexander Yu. Chistiakov – Research Engineer of the Computer-Aided Design of IC Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), chis.alexandr2018@yandex.ru

Mariya A. Zapletina – Cand. Sci. (Eng.), Scientific Researcher of the Computer-Aided Design of IC Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), zapletina_mariya@mail.ru

Научная статья
УДК 621.396.933:527.8
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-194-202
EDN: LLLMKX

Многофункциональный сенсорный модуль повышенной защищенности со спутниковой навигацией

Л. С. Челышев[1,2], С. П. Тимошенков[1], Н. И. Плис[3], В. О. Орлов[4]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]АО «Завод ПРОТОН», г. Москва, Россия
[3]АО «Ангстрем», г. Москва, Россия
[4]АО «НИИ молекулярной электроники», г. Москва, Россия

leonid.chelyshev@live.ru

Аннотация. Мониторинг состояния груза и определение его местоположения в процессе транспортирования – важная задача, так как согласно статистике пропажа грузов в России носит проблемный характер. В работе предложено электронное изделие, способное фиксировать местоположение груза в реальном времени. Рассмотрены аналоги предлагаемого решения. Разработана и изготовлена электронная система на основе инерциальных МЭМС, блока обработки информации, комплексированная с различными спутниковыми навигационными системами, такими как GPS, ГЛОНАСС, «Бэйдоу». Показано, что предложенная электронная система позволяет определять расположение объекта в пространстве, измерять внешние механические воздействия на объект и передавать их по GSM-каналу. Устройство работает в диапазоне температур от –55 до +60 °С и предназначено для широкого применения на транспорте, для контроля состояния различных перевозимых грузов. Создан опытный образец, автономно передающий показатели груза, такие как местоположение, ускорение, наличие вскрытия, температура внешняя и груза, и способный к подключению внешних датчиков. Проведен анализ существующих решений на рынке и места разработанного изделия среди них. Тестирование подтвердило работоспособность изделия.

Ключевые слова: системы ориентации и навигации, МЭМС, микроакселерометры, микрогироскопы, датчики угловой скорости, GPS, ГЛОНАСС

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (Договор №192ГССС15-L/78668).

© Л. С. Челышев, С. П. Тимошенков, Н. И. Плис, В. О. Орлов, 2024

Для цитирования: Челышев Л. С., Тимошенков С. П., Плис Н. И., Орлов В. О. Многофункциональный сенсорный модуль повышенной защищенности со спутниковой навигацией // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 194–202. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-194-202. – EDN: LLLMKX.

Original article

Multifunctional sensor module of increased security with satellite navigation

L. S. Chelyshev[1,2], S. P. Timoshenkov[1], N. I. Plis[3], V. O. Orlov[4]

[1]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[2]*"Zavod PROTON" JSC, Moscow, Russia*
[3]*"Angstrem" JSC, Moscow, Russia*
[4]*"Research Institute of Molecular Electronics" JSC, Moscow, Russia*

leonid.chelyshev@live.ru

Abstract. Cargo status monitoring and determining cargo location during transportation is an important task because statistics indicate that cargo loss in Russia is fraught with problems. In this work, an electronic device is proposed capable of recording cargo location in real time. Analogues of the proposed solution are considered. An electronic system based on inertial MEMS, an information processing unit, integrated with various satellite navigation systems such as GPS, GLONASS, BeiDou, has been developed and manufactured. It was shown that the proposed electronic system allows determining object location in space, measuring external mechanical effects on the object and transmitting them via a GSM channel. The device operates in the temperature range from –55 to +60 °C and is intended for wide use in transport and for monitoring the condition of various cargoes. A prototype was created that autonomously transmits cargo indicators, such as location, acceleration, presence of opening, external and cargo temperature, and is capable of external sensors connection. An analysis of existing solutions on the market and of the developed product's place among them was carried out. Tests have been carried out to prove the functionality of the product.

Keywords: orientation and navigation systems, MEMS, micro-accelerometers, micro-gyroscopes, angular velocity sensors, GPS, GLONASS

Funding: the work has been supported by the Innovation Promotion Fund (Contract No. 192GSS15-L/78668).

For citation: Chelyshev L. S., Timoshenkov S. P., Plis N. I., Orlov V. O. Multifunctional sensor module of increased security with satellite navigation. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 194–202. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-194-202. – EDN: LLLMKX.

Введение. Согласно статистике хищения грузов в России суммарный размер ущерба достигает 100 млн долл. [1], что оказывает негативное влияние не только на локальный, но и на международный бизнес. В связи с этим возникает необходимость в разработке устройства, способного регистрировать свое местоположение на протяжении всего пути следования груза, проводить замеры нескольких параметров, таких как тем-

пература груза и самого прибора, ускорение груза за период пересылки, контур, позволяющий определить вскрытие контейнера. Следует отметить, что большинство существующих на сегодняшний день подобных устройств (не пассивных) не военного назначения имеют диапазон рабочих температур от –40 до +80. Это не позволяет их использовать в условиях низких температур (–50 °С и ниже).

В настоящей работе рассматривается многофункциональный сенсорный модуль с применением МЭМС-датчиков [2], выдерживающий температуру –50 °С и ниже, а также способный точно отслеживать параметры грузовых контейнеров (местоположение, ускорение, удары, температуру, целостность) с регистрацией превышения максимально допустимых параметров и передавать эти данные по GSM-каналу.

Анализ существующих аналогов разрабатываемого многофункционального сенсорного модуля. Проведенный анализ существующих навигационных систем показал следующее. Системы имеют слабую защиту устройства: пластиковый корпус, слабая батарея, маленькая степень защиты от воздействия частиц и воды, невозможность отслеживания его вскрытия [3–5]. Характеристики проанализированных устройств представлены в таблице. Видно, что данные аналоги не учитывают температурных особенности перевозки грузов в зимний период в России (именно на это время приходится большая часть хищений). В связи с этим стоит задача создания максимально энергоэффективного устройства с подогревом. Однако, если устройство будет затрачивать много энергии на собственный подогрев, то встроенный аккумулятор будет не способен долго поддерживать работоспособность системы. Поэтому необходимо создать независимый контур подогрева с предельными характеристиками работы –55 °С. Логика работы такова: при преодолении температурного порога –40 °С и ниже сохранять в устройстве предельно низкую температуру работоспособности системы. Управление контуром должно быть автономным от общей работы системы, так как для экономии энергии микроконтроллер будет находиться в спящем режиме с активированными внешними прерываниями. Ранее для регистрации перемещений груза было создано и протестировано устройство повышенной защищенности от внешних воздействий. Проведенные исследования выявили ряд недостатков, а именно: отсутствие встроенного аккумулятора, слабую защиту от низких температур, аналоговый интерфейс для внешних датчиков, проблемное крепление, слабая проработка вопроса получения ГЛОНАСС-сигнала. Данные недостатки учтены при разработке климатически стойкого многофункционального сенсорного модуля повышенной защищенности со спутниковой навигацией (GPS, ГЛОНАСС, «Бэйдоу»).

Разработка многофункционального сенсорного модуля. Для решения поставленной задачи созданы структурная и макетная схемы печатной платы (рис. 1, *а*). В основе схемы, помимо схемы контроля температуры, используется микроконтроллер компании ST Microelectronics на базе ядра Cortex-M3, STM32F103C8T6, имеющий отечественный аналог. Контроллер собирает и анализирует поступившие параметры от различных датчиков, таких как аналоговый акселерометр, выбранный с учетом возможной замены на отечественный, датчики температуры и целостности. Датчики температуры подключаются по шине I2C, что дает возможность устанавливать их на большее расстояние относительно прототипа. Контроллер позволяет получать и передавать параметры по шинам данных UART, SPI. В устройстве используется ГЛОНАСС-модуль (либо GPS, Galileo и т. д.), обмен данных с которым реализуется по интерфейсу UART и протоколу NMEA. В начале работы все присоединенные датчики на шину I2C проходят процедуру инициализации, что дает возможность оборудовать

Характеристики навигационных устройств
Characteristics of navigation devices

Устройство	Наличие других датчиков	Напряжение питания, В	Напряжение батареи, В	Емкость аккумулятора, мА·ч	Рабочая температура, °С	Степень защиты	Масса, г	Материал	Объем памяти
Omnicomm Optim	Акселерометр, датчик топлива	8–65	–	1400, Li-pol	От –40 до +85	IP52	150	–	–
Omnicomm АСН ЭРА	Датчик вскрытия корпуса, акселерометр	8–65	–	1400	От –40 до +85	–	–	Пластик	–
Бортовой терминал КТ-56L	Акселерометр	10–48	3,7	Не менее 400	От –30 до +70	IP30	Не более 300	Дюралюминий	4 Мбайт
Бортовой терминал КТ- 56XL	Акселерометр, микрофон	10–48	3,7	Не менее 700	От –30 до +70	IP30	Не более 300		8 Мбайт
Бортовой терминал КТ- 56XXL	Акселерометр, микрофон	10–48	3,7	Не менее 1400	От –30 до +70	IP30	Не более 300		8 Мбайт
Galileosky 7x C	Акселерометр	9–39	–	600	От –40 до +85	–	–	–	–
ГдеМои M1		–	3,7	3000	От –20 до +70	IPX7	133	Пластик	–
ГдеМои M2	Датчик температуры, G-сенсор	–	3	≈ 1500	От –40 до +70	–	116		–
ГдеМои M5	Датчик вскрытия груза	–	3	4500	От –20 до +60	–	112		–
ГдеМои M8	Акселерометр	–	3,7	5 800	От –20 до +85	IPx5	227		–
ГдеМои M9	Датчик вскрытия корпуса, акселерометр	–	3,7	10 000	От –20 до +70	IPX5	285		64 Мбайт
ГдеМои A8	Акселерометр	10–30	3,7	170	От –25 до +55	-	52		До 32 Гбайт
Meitrack T355		–	3,7	7400	От –15 до +65	IP66	322	ABS-пластик	8 Мбайт
Kingneed TK-20		–	3,7	10 000	От –10 до +55	IPX7	569	–	До 32 Гбайт

Примечание: все устройства имеют GPS-трекер; «–» – нет информации.

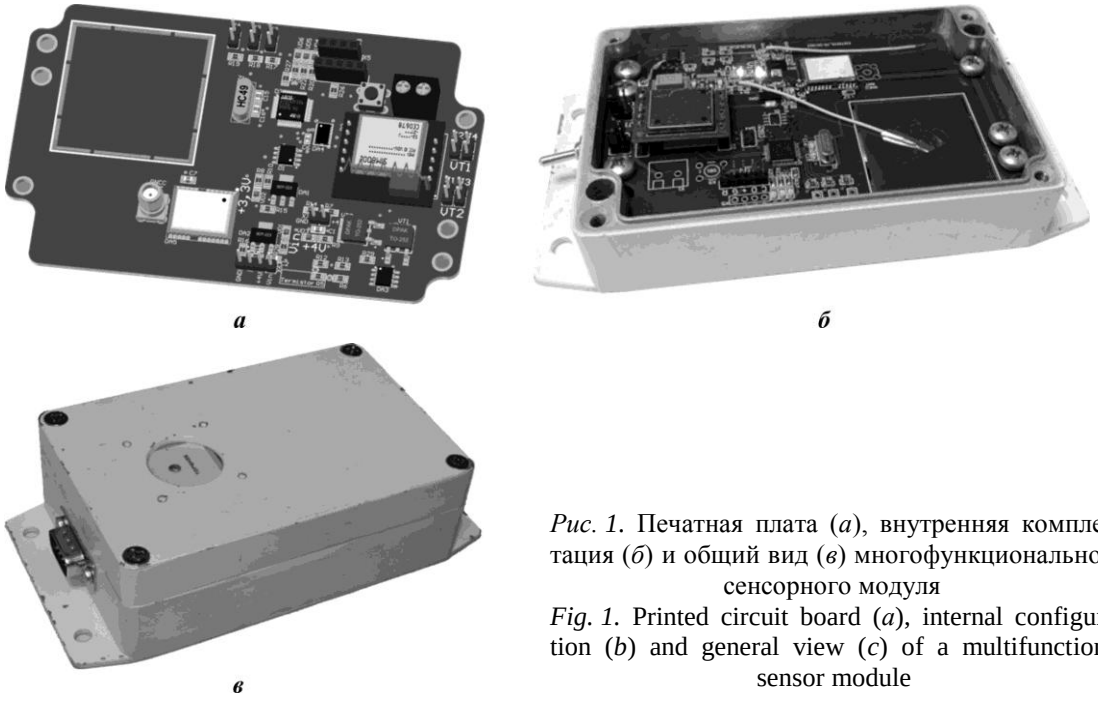


Рис. 1. Печатная плата (*а*), внутренняя комплектация (*б*) и общий вид (*в*) многофункционального сенсорного модуля

Fig. 1. Printed circuit board (*a*), internal configuration (*b*) and general view (*c*) of a multifunctional sensor module

устройство различными датчиками без изменений программного кода. Информация с датчиков поступает сначала в микроконтроллер, далее необходимая информация перерабатывается и записывается в энергонезависимую флеш-память, откуда быстро передается в управляющее устройство. Также интерфейс UART использует GSM-модуль, передающий все актуальные данные. GSM-модуль способен получать новые настройки, которые будут применены в устройстве, например настройки частоты пробуждения модуля.

Для успешной зарядки устройства поступающее напряжение составляет 6–36 В. Аккумулятор представляет собой батарею емкостью 5000 мА·ч и напряжением 3,8 В, что обеспечивает длительную работу устройства с расходом в активной работе 50 мА (без учета подогрева). Контуры целостности обеспечивают большую трудоемкость сценариев механического взлома устройства без срабатывания датчиков, сигнализирующих об этом. Выбранный корпус защищает устройство от внешних воздействий. Принятые конструкторские решения позволяют эффективно распределять энергию, получать и передавать сигналы, а также обеспечивать максимальную надежность. Работа системы промоделирована и показала отличные результаты. Внутренняя комплектация и общий вид модуля приведены на рис. 1, *б*, *в*.

Многофункциональный сенсорный модуль реализован в виде печатной платы 4 класса точности согласно ГОСТ 23.751-86 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» (или стандарту 6/6mil) на стеклотекстолите FR-4, что обеспечивает достаточно дешевое производство, с покрытием HASL. Общая толщина платы 1,6 мм с напаянными элементами – поверхностным монтажом и выводным монтажом. В устройстве имеются основная плата, которая реализует описанные функции, модуль SIM800L, GSM-приемопередатчик.

Схемы оформлены согласно ГОСТу (для создания конструкторской документации) и ЕСКД, что дает возможность быстро согласовывать документы с заказчиком. Модуль установлен в алюминиевый корпус со степенью защиты IP68. Корпус изготовлен из сплава ADC-10 по стандарту JIS. Данная марка алюминия является аналогом ENAC-AlSi9Cu3(Fe), прочность на растяжение которой составляет 240 МПа, что делает модуль устойчивым к внешним воздействиям.

Для теплоизоляции корпус изнутри покрыт утеплителем из джута. Функция подогрева в рамках устройства осуществляется с помощью резисторов малых сопротивлений, а также проводов высоких сопротивлений.

Тестирование разработанного многофункционального сенсорного модуля. По выполненным тестам превышения температурного режима практически не происходит. Наибольшие температурные всплески (помимо нагревательной цепи) наблюдаются в микроконтроллере, ГЛОНАСС-модуле и стабилизаторе напряжения. Они превышают температурные показатели пространства на 2–3 °С при нормальных температурных условиях. Это дает возможность при предельно низких внешних температурах максимально эффективно расходовать энергию, а при высоких температурах – не перегревать прибор.

Полученные данные позволяют оценить эффективность метода обогрева печатной платы (рис. 2). Из рисунков следует, что нагрев происходит в четырех точках, в которых при комнатной температуре температура многофункционального сенсорного модуля достигает 70–75 °С.

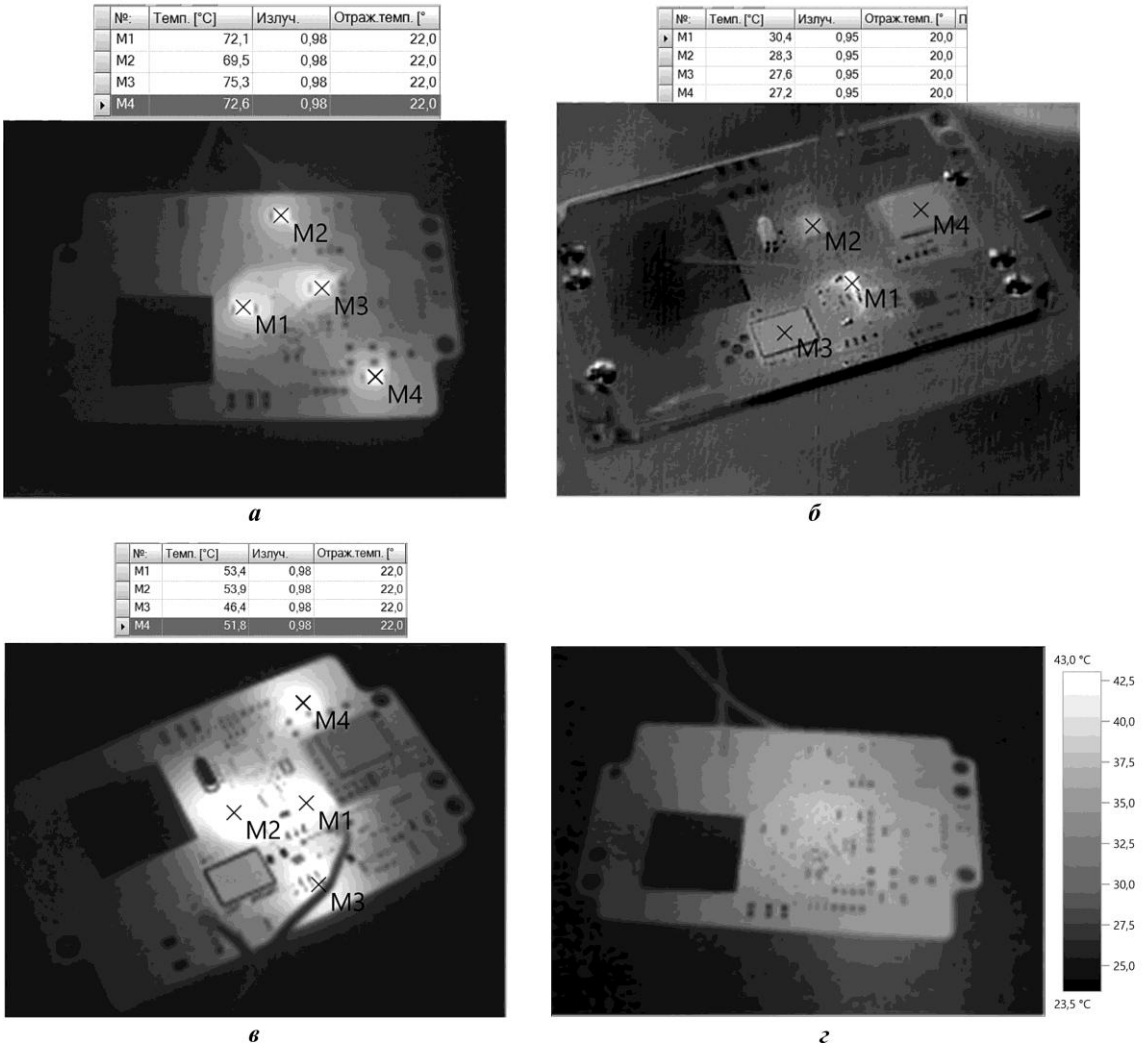


Рис. 2. Температурные распределения на многофункциональном сенсорном модуле: *а* – с задней стороны без основных компонентов; *б* – с передней стороны без влияния силовых резисторов; *в* – с передней стороны под влиянием силовых резисторов; *г* – с задней стороны после выключения силовых резисторов
Fig. 2. Temperature distribution on the multifunctional sensor module: *a* – from the rear side without main components; *в* – from the front side without the influence of power resistors; *c* – from the front side under the influence of power resistors; *d* – from the rear side after turning off the power resistors

Отметим, что распределение тепла можно увеличить, введя технологические операции по заливке теплопроводным компаундом в местах расположения резисторов. Это позволит передавать тепло на металлизированные полигоны, что, в свою очередь, снизит необходимую для подогрева энергию аккумулятора. Существует проблема передачи температуры модулю SIM800L (рис. 2, *б*, *в*), обусловленная отсутствием теплопередачи между модулями. Данная проблема решается добавлением дополнительного резистора под модуль и теплопроводящего материала между основным модулем и модулем GSM-связи. Результаты проведенных климатических исследований модуля показали его работоспособность при температуре –55 °С и возрастающем при этом потреблении тока до 0,57 А.

На рис. 3 показан процесс охлаждения многофункционального сенсорного модуля и его функционирование в рамках поставленной задачи. Видно, что стабилизация температуры происходит на уровне –29 °С, далее включается цепь подогрева, которая не позволяет температуре опускаться ниже. Потребление возрастает на порядок, однако это обеспечивает стабильную работу модуля. По проведенным расчетам при температуре –75 °С и стабилизации на уровне –40 °С модуль сможет работать гарантированно не менее 10 ч при заряде одной батареи.

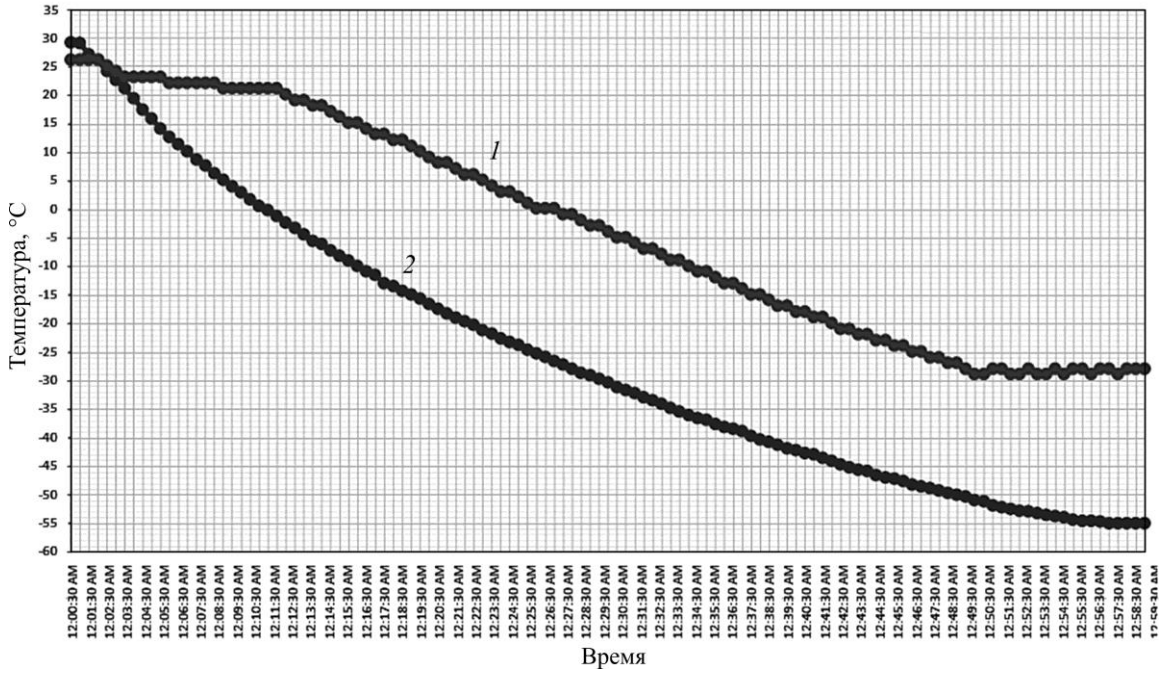


Рис. 3. Температурные испытания многофункционального сенсорного модуля: *1* – температура внутри прибора; *2* – выход на рабочую температуру камеры тепла и холода
Fig. 3 Temperature tests of the multifunctional sensor module: *1* – the temperature inside the device; 2 – output to the operating temperature of the heat and cold chamber

Модуль прошел вибрационные испытания, в том числе синусоидальные испытания (50–500 Гц) и одиночный удар (10 *g*). Модуль успешно справился с нагрузками и по окончании испытаний продолжил работу в штатном режиме.

Заключение. Разработанный многофункциональный сенсорный модуль определения геолокации характеризуется повышенной защищенностью и дополнительными функциями в виде датчиков ускорения, целостности, температуры. Доработанный корпус позволяет устройству эффективно работать. Модуль имеет схемотехнические, кон-

струкционные, элементные, функциональные отличия от аналогов, а именно наличие цепей контроля целостности и температуры. В ходе температурных испытаний установлено, что прибор хорошо справляется с внешними температурными воздействиями. Получен патент на полезную модель разработанного устройства [6].

В дальнейшем планируется доработать программу функционирования, конструкторские решения для повышения энергоэффективности работы устройства в условиях низких температур.

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

Литература

1. Совместный отчет TT Club, IMPACT и TAPA о криминальных тенденциях в грузоперевозках в России: сайт ATI.STU [Электронный ресурс]. 2020. URL: https://www.ttclub.com/media/files/tt-club/cargo-theft-in-russia/cargo-theft-trends-in-russia-2020-russian.pdf (дата обращения: 20.11.2022).

2. ***Калинкина М. Е., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л., Комарова А. В.*** Микроэлектромеханические системы и датчики: учеб. пособие. СПб.: Ун-т ИТМО, 2020. 75 с. // Учебные издания ИТМО [Электронный ресурс]. URL: https://books.ifmo.ru/file/pdf/2673.pdf (дата обращения: 22.01.2024).

3. ***Бром А. Е., Евстифеева Н. В.*** Разработка логистической поддержки для объектов космической техники на примере сверхмалого космического аппарата «Парус-МГТУ» // Организатор производства. 2014. № 2 (61). С. 90–97. EDN: SJJJZT.

4. Пат. 71489 РФ. Спутниковый навигационный приемник / ***С. А. Мосиенко, В. Г. Немудров, И. Л. Корнеев, В. П. Польщиков***; заявл. 03.12.2007; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. 15 с. EDN: KOYWBU.

5. Пат. 193444 РФ. Спутниковый маяк / ***А. А. Головлев***; заявл. 14.01.2019; опубл. 29.10.2019, Бюл. № 31. 11 с. EDN: FHYQSN.

6. Пат. RU218350U1 РФ. Многофункциональный сенсорный модуль спутниковой радионавигации / ***Л. С. Челышев***; заявл. 21.11.2022; опубл. 23.05.2023, Бюл. № 15. 8 с. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/22/d3/16/d0fe0994e30e96/RU218350U1.pdf (дата обращения: 25.02.2024)

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.09.2023 г.; принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Челышев Леонид Сергеевич – аспирант Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), начальник отдела разработки систем управления и вычислительных устройств АО «Завод ПРОТОН» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8), leonid.chelyshev@live.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

Плис Николай Иванович – кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора АО «Ангстрем» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2, стр. 3), plis@angstrem.ru

Орлов Виктор Олегович – ведущий специалист отдела патентно-лицензионной работы и технической литературы АО «НИИ молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1), vityahimki@mail.ru

References

1. *Trans-Siberian Railway in figures and facts*: website ATI.STU. 2020. (In Russian). Available at: https://aif.ru/dontknows/file/transsibirskaya_magistral_v_cifrah_i_faktah (accessed: 20.11.2022).

2. Kalinkina M. E., Pirozhnikova O. I., Tkalich V. L., Komarova A. V. Microelectromechanical systems and sensors, study guide. St. Petersburg, ITMO Univ., 2020. 75 p. (In Russian). *Uchebnye izdaniya ITMO*. Available at: https://books.ifmo.ru/file/pdf/2673.pdf (accessed: 22.01.2024).

3. Brom A., Evstifeeva N. V. Development of logistics support for space equipment on the base of the "Sail-BMSTU" midget spacecraft. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production,* 2014, no. 2 (61), pp. 90–97. (In Russian). EDN: SJJJZT.

4. Mosienko S. A., Nemudrov V. G., Korneev I. L., Polshchikov V. P. *Satellite navigation receiver.* Patent 71489 RF, publ. 10.03.2008, Bul. no. 7. 15 p. (In Russian). EDN: KOYWBU.

5. Golovlev A. A. *Satellite beacon.* Patent 193444 RF, publ. 29.10.2019, Bul. no. 31. 11 p. (In Russian). EDN: FHYQSN.

6. Chelyshev L. S. *Multifunctional sensor module for satellite radio navigation.* Patent RU218350U1 RF, publ. 23. 05.2023, Bul. no. 15. 8 p. (In Russian). Available at: https://patentimages.storage.googleapis.com/22/d3/16/d0fe0994e30e96/RU218350U1.pdf (accessed: 25.02.2024).

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 15.09.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Leonid S. Chelyshev – PhD student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Head of the Development of Control Systems and Computing Devices Department, "Zavod PROTON" JSC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 8), leonid.chelyshev@live.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

Nikolay I. Plis – Cand. Sci. (Eng.), First Deputy General Director, "Angstrem" JSC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 2, bld. 3), plis@angstrem.ru

Viktor O. Orlov – Leading Specialist Department of the Patent and Licensing Work and Technical Literature, "Research Institute of Molecular Electronics" JSC (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Akademik Valiev st., 6, bld. 1), vityahimki@mail.ru

Уважаемые авторы!

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

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА
INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Научная статья
УДК 621.373
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-203-209
EDN: KVCOQW

Исследование характеристик управляемого генератора 10-см диапазона

А. Н. Зикий, А. С. Кочубей

АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», г. Таганрог, Россия

zikiy50@mail.ru

Аннотация. Важной составной частью широкодиапазонной измерительной аппаратуры являются управляемые генераторы. Генератор 10-см диапазона (2,1–3,7 ГГц) входит в состав анализатора цепей Х1-55. Однако данные о выявлении паразитных параметров выходного сигнала – нелинейности перестройки, выбега частоты, зависимости частоты от напряжения питания, уровней гармоник – в техническом описании измерительного прибора Х1-55 отсутствуют. В работе рассмотрены экспериментальные характеристики генератора 10-см диапазона, в том числе модуляционная характеристика, зависимость частоты от напряжения питания, выбег частоты, спектр выходного сигнала в ближней и дальней зонах. Приведены принципиальная схема задающей части генератора и описание ее конструкции. Получены следующие результаты: диапазон рабочих частот 2,1–3,7 ГГц; выходная мощность (15,8 ± 0,44) дБм; управляющее напряжение от 2 до 36 В; средняя крутизна модуляционной характеристики 0,45 МГц/В; напряжение питания положительное (+12 В); напряжение питания отрицательное (–6 В); подавление второй гармоники 31,7 дБ; подавление третьей гармоники 33,7 дБ; ток потребления по цепи +12 В составил 110 мА. Сравнение заданных и полученных основных значений параметров генератора показало, что основные требования, предъявляемые к таким устройствам, обеспечиваются.

Ключевые слова: управляемый генератор, модуляционная характеристика, выбег частоты, спектр выходного сигнала

Для цитирования: Зикий А. Н., Кочубей А. С. Исследование характеристик управляемого генератора 10-см диапазона // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 203–209. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-203-209. – EDN: KVCOQW.

© А. Н. Зикий, А. С. Кочубей, 2024

Original article

Research of the characteristics of a controlled 10-cm range generator

A. N. Zikiy, A. S. Kochubey

JSC "Taganrog Research Institute of Communications", Taganrog, Russia

zikiy50@mail.ru

Abstract. Controlled generators are an important component of wide-range measuring equipment. A 10-cm range (2.1–3.7 GHz) wave generator is a part of the X1-55 circuit analyzer. However, there is no data on detecting parasitic parameters of the output signal – tuning nonlinearity, frequency run-out, frequency dependence on the supply voltage, harmonic levels – in technical description of the X1-55 measuring instrument. In this work, experimental characteristics of a 10-cm range wave generator are considered, including modulation characteristic, frequency dependence on the supply voltage, frequency run-out, and output signal spectrum in the near and far zones. The functional diagram of driving part of the generator and the design description are given. The following results were obtained: operating frequency range is 2.1–3.7 GHz; power output is (15.8 ± 0.44) dBm; control voltage is from 2 to 36 V; average gain slope of modulation characteristic is 0.45 MHz/V; positive supply voltage (+12 V); negative supply voltage (–6 V); second harmonic suppression is 31.7 dB; third harmonic suppression is 33.7 dB. The current consumption in the +12 V circuit was 110 mA. Comparison of predetermined and obtained basic values of generator parameters has demonstrated the compliance with basic requirements specified for these devices.

Keywords: controlled generator, modulation characteristic, frequency run-out, output signal spectrum

For citation: Zikiy A. N., Kochubey A. S. Research of the characteristics of a controlled 10-cm range generator. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 203–209. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-203-209. – EDN: KVCOQW.

Введение. Управляемые по частоте генераторы применяются в приемно-передающих устройствах и измерительной технике, поэтому их исследованию уделяется большое внимание [1–9]. Управляемый генератор 10-см диапазона (2,1–3,7 ГГц) входит в состав измерительного прибора Х1-55 [10, 11]. Следует отметить, что в техническом описании [10, 11] сведения о паразитных параметрах выходного сигнала генератора – нелинейности перестройки, выбега частоты, зависимости частоты от напряжения питания, уровней второй и третьей гармоник – не приводятся.

К управляемому генератору предъявляются следующие требования: диапазон рабочих частот F от 2100 до 3700 МГц; выходная мощность $P_{вых}$ не менее 14 дБм; управляющее напряжение $U_{упр}$ от 2 до 50 В; напряжение питания $U_{пит}$ = + 12 и – 6 В; генератор должен иметь два выхода; сопротивление нагрузки 50 Ом.

Схема и конструкция управляемого генератора. Задающий генератор диапазона 2,1–3,7 ГГц вырабатывает перестраиваемый СВЧ-сигнал в диапазоне 2110–3685 МГц. Перестройка частоты генератора осуществляется напряжением, изменяющимся от –2 В (и более) до +50 В (и менее). Он собран на транзисторе VT1 (2Т642А–2) [12] по схеме с общим коллектором (по постоянному току с общей базой). Для перестройки частоты генератора используются два варикапа VD1, VD2 (2А611Б), встречно-включенные в цепь база – коллектор (корпус). СВЧ-сигнал задающего генератора снимается регулируемыми петлями связи и через согласующие аттенюаторы поступает на выходы. Схема и внешний вид управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц показаны на рис. 1.

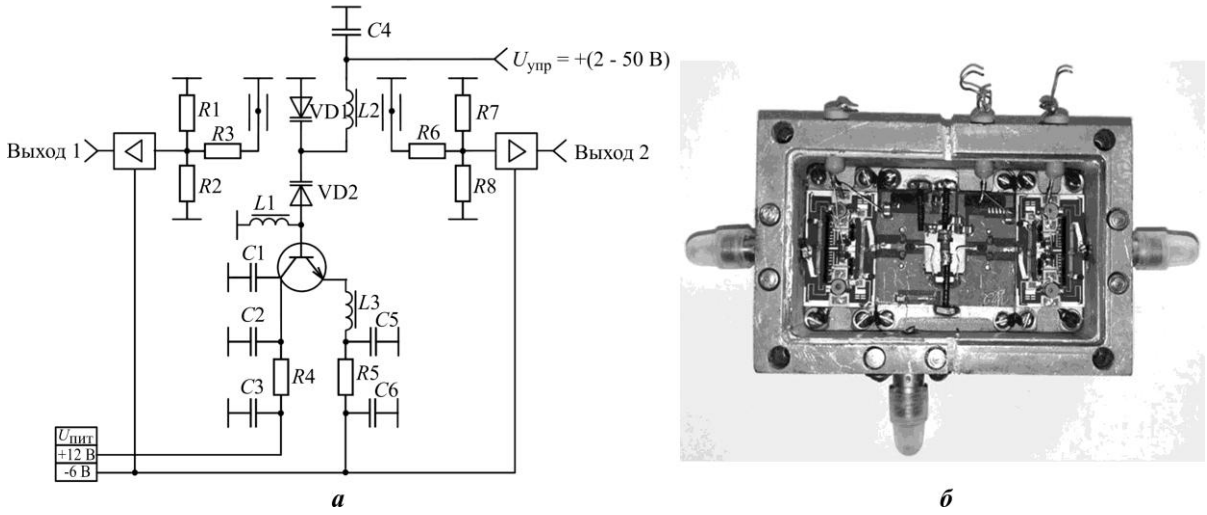


Рис. 1. Принципиальная схема (*а*) и внешний вид (*б*) управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц
Fig. 1. Schematic diagram (*a*) and appearance (*b*) of the controlled 2.1–3.7 GHz range generator

Задающий генератор размещен в корпусе чашечного типа из алюминиевого сплава и имеет внешние размеры 73 × 47 × 24 мм. В качестве подложки используется керамика 22ХС. Выходы и управление выполнены в виде гнезд типа IX согласно ГОСТ 13317-89 [13]. Питание подается через помехоподавляющие конденсаторы типа Б23. На нижней поверхности корпуса имеется оребрение для улучшения рассеивания избыточного тепла.

Эксперимент. Эксперимент проводили на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема измерительной установки
Fig. 2. Block diagram of the measuring unit

В процессе эксперимента измеряли следующие параметры управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц: модуляционную характеристику; зависимость частоты от напряжения питания; выбег частоты. Результаты измерений показаны на рис. 3–5. Выбег частоты, согласно рис. 5, составил 0,323 МГц.

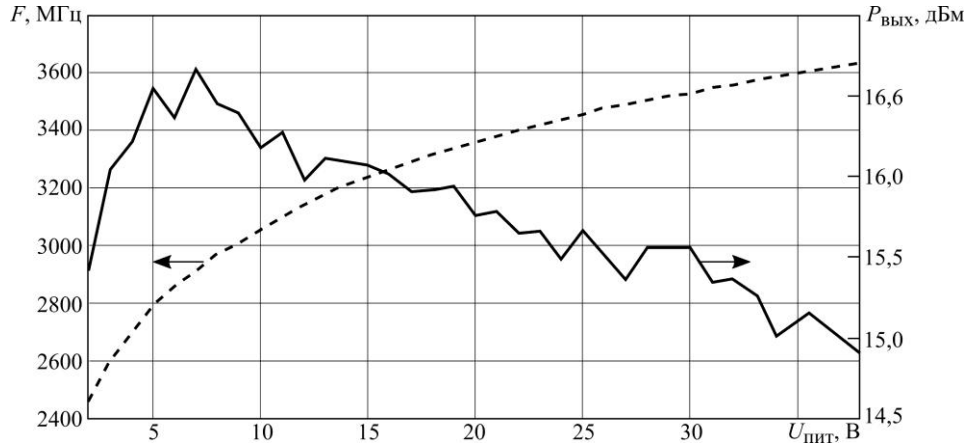


Рис. 3. Модуляционная характеристика управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц
Fig. 3. Modulation characteristic of the controlled 2.1–3.7 GHz range generator

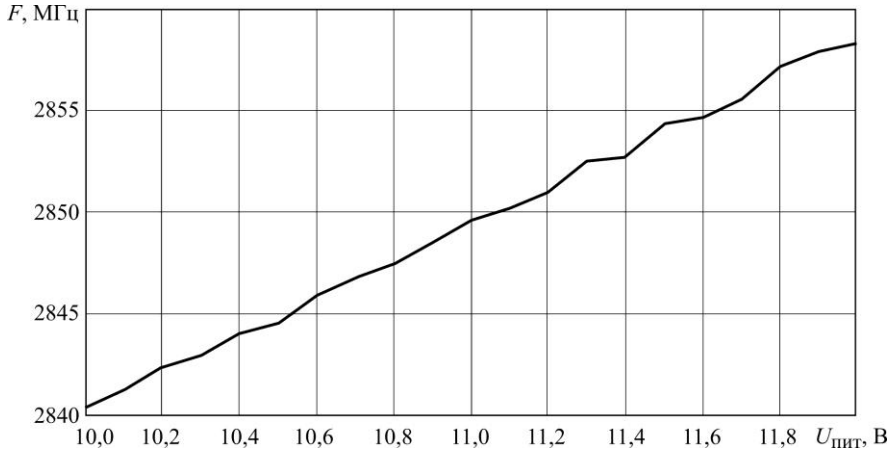


Рис. 4. Зависимость частоты от напряжения питания
Fig. 4. Frequency dependence on supply voltage

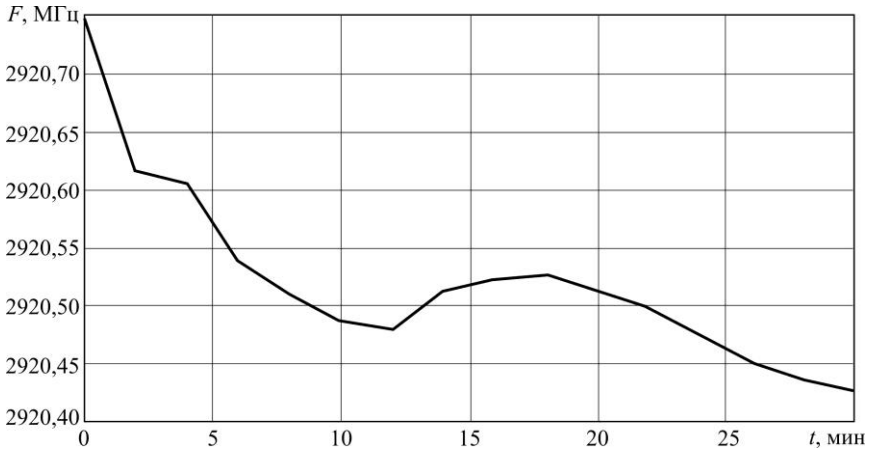
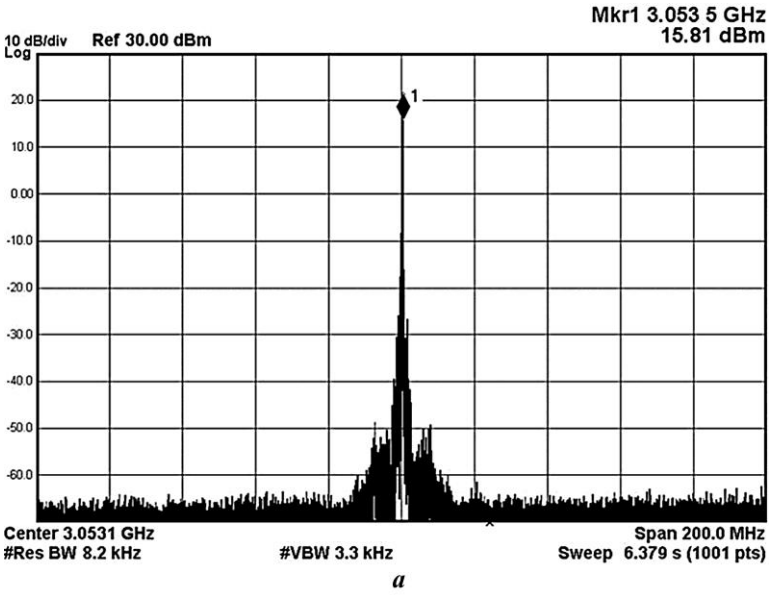
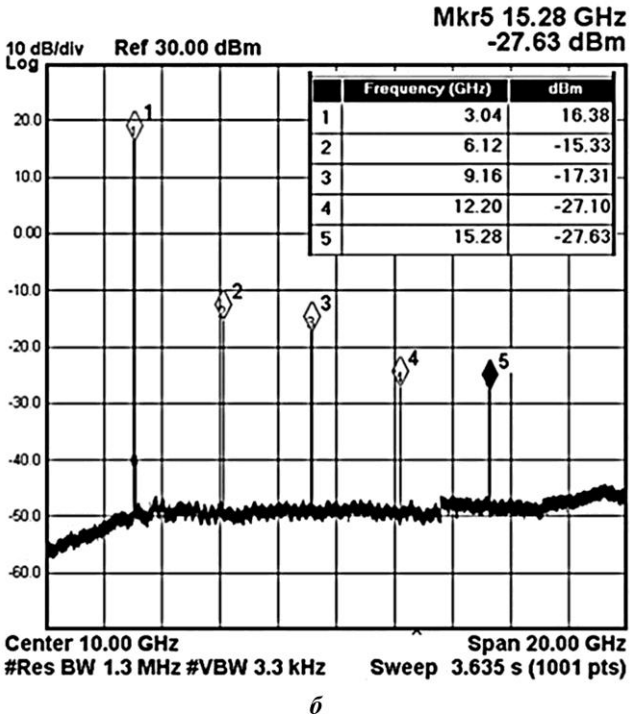


Рис. 5. Выбег частоты за 30 мин после включения при $U_{упр}$ = 7 В
Fig. 5. Frequency run-out 30 min after switching on at $U_{упр}$ = 7 V

На рис. 6 показаны спектры выходного сигнала управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц в ближней и дальней зонах. Из рис. 6, *а* видно, что ширина спектральной линии не превышает 100 кГц на уровне –20 дБ от максимума. Рис. 6, *б* позволяет сделать вывод об уровне гармоник основной частоты: вторая гармоника подавлена на 31,7 дБ, а третья гармоника – на 34,6 дБ по отношению к полезному сигналу. Установлено, что ширина спектральной линии и стабильность несущей частоты существенно зависят от пульсаций источника управляющего напряжения и его стабильности.



а



б

Рис. 6. Спектры сигнала на выходе управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц:
а – в ближней зоне; *б* – в дальней зоне (5 гармоник)
Fig. 6. The spectra of the signal at the output of the controlled 2.1–3.7 GHz range generator:
a – in the near zone; *b* – in the far zone (5 harmonics)

Результаты измерений основных параметров управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц приведены в таблице.

Значения основных параметров управляемого генератора диапазона 2,1–3,7 ГГц
The values of the main parameters of the controlled 2.1–3.7 GHz range generator

Параметр	Значение	
	заданное	измеренное
Диапазон рабочих частот, МГц	2100–3700	2460–3632
Выходная мощность, дБм, не менее	≥14	15,8 ± 0,44
Выбег частоты за 30 мин после включения, МГц	–	0,323
Ширина спектральной линии на уровне –20 дБ от максимума, кГц	–	100
Управляющее напряжение, В	2–50	2–36
Средняя крутизна модуляционной характеристики, МГц/В	–	0,45
Напряжение питания положительное, В	+12	+12
Напряжение питания отрицательное, В	–6	–6
Подавление второй гармоники, дБ	–	31,7
Подавление третьей гармоники, дБ	–	33,7
Ток потребления по цепи +12 В, мА	–	110

Заключение. Проведенные исследования показали, что основные требования к управляемому генератору диапазона 2,1–3,7 ГГц обеспечиваются (см. таблицу). Генератор может быть использован в качестве гетеродина приемника и в измерительной аппаратуре.

Литература

1. ***Баранов А. В., Кревский М. А.*** Транзисторные автогенераторы гармонических СВЧ-колебаний. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 276 с.

2. ***Ченакин А. В., Горевой А. В.*** Практическое построение синтезаторов частот СВЧ-диапазона. М.: Горячая линия – Телеком, 2022. 280 с.

3. ***Верещагин Е. М., Волошин А. П., Никитенко Ю. Г.*** Транзисторно-варакторные генераторы. Киев: Техніка, 1979. 175 с.

4. ***Белов Л. А.*** Устройства формирования СВЧ-сигналов и их компоненты: учеб. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 320 с.

5. ***Зикий А. Н., Помазанов А. В.*** Передатчики помех современным средствам связи: учеб. пособие. Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. 176 с.

6. ***Андрианов А. В., Зикий А. Н., Давтян А. Д.*** Генератор частотно-модулированных сигналов // Инженерный вестник Дона: электрон. журн. 2019. № 2. EDN: LHROMD. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5722 (дата обращения: 17.01.2023).

7. ***Губарев Д. Е., Зикий А. Н., Кочубей А. С.*** Генератор с варикапной настройкой и микрополосковым резонатором // Вестник связи. 2022. № 7. С. 4–7. EDN: HVRYXJ.

8. ***Горевой А. В.*** Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники: дис. … канд. техн. наук. Томск, 2017. 118 с.

9. А. с. 1020967 СССР. Частотный модулятор / ***Г. В. Никонов, Ю. К. Худяков, А. Б. Янкевич***; заявл. 06.07.1981; опубл. 30.05.1983, Бюл. № 20.

10. Прибор для исследования амплитудно-частотных характеристик Х1-55: техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1.400.293ТО. М.: Внешторгиздат, 2006. 196 с.

11. Прибор для исследования амплитудно-частотных характеристик Х1-55: альбом схем, 1.400.293ТО1. М.: Внешторгиздат, 2006. 134 с.

12. ***Петухов В. М.*** Биполярные транзисторы средней и большой мощности сверхвысокочастотные и их зарубежные аналоги: справочник. Т. 4. М.: КУбК-а, 1997. 544 с.

13. ГОСТ 13317–89. Элементы соединения СВЧ трактов радиоизмерительных приборов. Присоединительные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1989. 44 с.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 26.06.2023 г.;
принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Кочубей Алексей Сергеевич – инженер-конструктор АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи» (Россия, 347900, г. Таганрог, ул. Седова, 3), l.co4ubey@ya.ru

Зикий Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи» (Россия, 347900, г. Таганрог, ул. Седова, 3), zikiy50@mail.ru

References

1. Baranov A. V., Krevskiy M. A. *Transistor self-excited generators of harmonic microwave oscillations.* Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2021. 276 p. (In Russian).

2. Chenakin A. V., Gorevoy A. V. *Practical construction of microwave band frequency synthesizers.* Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2022. 280 p. (In Russian).

3. Vereshchagin E. M., Voloshin A. P., Nikitenko Yu. G. *Transistor-varactor generators.* Kyiv, Tekhnika Publ., 1979. 175 p. (In Russian).

4. Belov L. A. *Microwave signal generation devices and their components,* study guide. Moscow, MPEI Publ. house, 2010. 320 p. (In Russian).

5. Zikiy A. N., Pomazanov A. V. *Modern communication equipment jammers,* study guide. Rostov-on-Don, Taganrog, SFedU Publ., 2020. 176 p. (In Russian).

6. Andrianov A. V., Zikiy A. N., Davtyan A. D. Frequency modulated signal generator. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Journal of Don,* 2019, no. 2. (In Russian). EDN: LHROMD. Available at: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5722 (accessed: 17.01.2023).

7. Gubarev D. E., Zikiy A. N., Kochubey A. S. Generator with varicap tuning and microstrip resonator. *Vestnik svyazi = Vestnik Communications,* 2022, no. 7, pp. 4–7. (In Russian). EDN: HVRYXJ.

8. Gorevoy A. V. *Low-power sources of continuous microwave signals for measuring equipment,* diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Tomsk, 2017. 118 p. (In Russian).

9. Nikonov G. V., Khudyakov Yu. K., Yankevich A. B. *Frequency modulator.* Inventor's certificate 1020967 USSR, publ. 30.05.1983, Bul. no. 20. (In Russian).

10. *Instrument for frequency response analysis X1-55*, technical description and operating instructions, 1.400.293TO. Moscow, Vneshtorgizdat Publ., 2006. 196 p. (In Russian).

11. *Instrument for frequency response analysis X1-55,* diagram manual, 1.400.293TO1. Moscow, Vneshtorgizdat, 2006. 134 p. (In Russian).

12. Petukhov V. M. *Bipolar microwave transistors of medium and high power and their foreign analogues,* reference book. Vol. 4. Moscow, KUbK-a Publ., 1997. 544 p. (In Russian).

13. GOST 13317–89. *Connectors of microwave channels of radiomeasuring apparatus. Connecting dimensions.* Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1989. 44 p. (In Russian).

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Alexey S. Kochubey – Design Engineer, JSC "Taganrog Scientific Research Institute of Communication" (Russia, 347900, Taganrog, Sedov st., 3), l.co4ubey@ya.ru

Anatoly N. Zikiy – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, JSC "Taganrog Scientific Research Institute of Communication" (Russia, 347900, Taganrog, Sedov st., 3), zikiy50@mail.ru

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
BIOMEDICAL ELECTRONICS

Научная статья
УДК 621.317.321
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-210-222
EDN: NQVQVI

Разработка портативной системы длительного кардиомониторирования на основе емкостных биосенсоров и эластичных межсоединений

Н. С. Горлов[1], Д. В. Вертянов[1], С. П. Тимошенков[1], В. Р. Погодин[2], Ф. Б. Лазба[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», г. Москва, Россия

gorlov.nikolai.s@mail.ru

Аннотация. Системы длительного кардиомониторирования расширяют диагностические возможности стационарных электрокардиографов и могут отслеживать функционирование сердца в динамике продолжительное время. На сегодняшний день имеется множество вариантов реализации систем длительного кардиомониторирования, отличающихся друг от друга как конструктивно, так и по функциональным возможностям. Однако во всех применяемых системах имеется ряд недостатков, не позволяющих совмещать в себе устройство одновременно с высоким качеством показаний и удобное в эксплуатации. В работе представлена разработанная нательная система длительного кардиомониторирования, регистрирующая 12 стандартных отведений электрокардиограммы. Измерение электрических потенциалов с поверхности кожи осуществлено группой емкостных сенсоров, подключаемых эластичными шлейфами к обрабатывающему устройству, тем самым исключаются из конструкции длинные объемные провода, вызывающие дискомфорт пациента при длительном использовании. Показана возможность передачи данных электрокардиографии с помощью USB-кабеля, micro-SD-карты или беспроводного сопряжения устройства со смартфоном через Bluetooth, а также регистрации и передачи данных положения и перемещения пациента для сопоставления с электрокардиограммой с помощью встроенного МЭМС-датчика. Приведено описание конструкции и работы функциональных узлов системы. Разработанная система характеризуется низкими массогабаритными показателями, что удобно при длительном кардиомониторировании. При этом диагностические возможности для выявления различных сердечно-сосудистых заболеваний остаются.

© Н. С. Горлов, Д. В. Вертянов, С. П. Тимошенков, В. Р. Погодин, Ф. Б. Лазба, 2024

Ключевые слова: кардиомониторирование, емкостной биосенсор, электрокардиограмма, носимая электроника, эластичная электроника, измерение электрических потенциалов

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Для цитирования: Разработка портативной системы длительного кардиомониторирования на основе емкостных биосенсоров и эластичных межсоединений / Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П. и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 210–222. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-210-222. – EDN: NQVQVI.

Original article

Development of a portable long-term cardiac monitoring system based on capacitive biosensors and stretchable interconnections

N. S. Gorlov[1], D. V. Vertyanov[1], S. P. Timoshenkov[1], V. R. Pogodin[2], F. B. Lazba[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]"Submicron Research Institute" JSC, Moscow, Russia

gorlov.nikolai.s@mail.ru

Abstract. Long-term cardiac monitoring systems extend the diagnostic capabilities of stationary electrocardiographs and can monitor heart function over a protracted period. To date, there are many options for implementing long-term cardiac monitoring systems that differ from each other both structurally and functionally. However, all systems used on the market have a variety of disadvantages that do not allow combining the device with high quality readings and convenient operation at the same time. In this work, the developed wearable long-term cardiac monitoring system is presented that registers 12 standard electrocardiogram leads. Measurement of electrical potentials from the skin surface is carried out by a group of capacitive sensors connected by stretchable cables to the processing device, thereby excluding from the design long cables that cause discomfort to the patient during prolonged use. A possibility was shown to transmit ECG via USB cable, microSD card or device's wireless Bluetooth pairing to a smartphone, and to record and transmit the patient's position and movement data for comparison with the electrocardiogram using built-in MEMS sensor. The description of the design and operation of the functional units of the system is given. The developed system is characterized by low weight-size parameters that improves patient's experience during long-term cardiac monitoring, while maintaining the diagnostic capabilities to detect various cardiovascular diseases.

Keywords: cardiac monitoring, capacitive biosensor, electrocardiogram, wearable electronics, stretchable electronics, electrical potentials measurement

Funding: the work has been supported by the Foundation for Assistance to the Development of Small Innovative Enterprises in the Scientific and Technical Sphere.

For citation: Gorlov N. S., Vertyanov D. V., Timoshenkov S. P., Pogodin V. R., Lazba F. B. Development of a portable long-term cardiac monitoring system based on capacitive biosensors and stretchable interconnections. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 210–222. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-210-222. – EDN: NQVQVI.

Введение. Современная электрокардиография является основным методом исследования работы сердечно-сосудистой системы человека, основанным на фиксации и изучении биоэлектрических импульсов, возникающих во время работы сердца. Регистрация электрокардиограммы (ЭКГ) подразумевает измерение разности биоэлектрических потенциалов между различными точками на теле пациента посредством наложения медицинских электродов. Совокупность таких точек, исходя из мест установки электродов, регистрирующих импульсы с миокарда под разным углом, определяет возможность снятия показаний по стандартным, усиленным и грудным отведениям. Метод классической стационарной электрокардиографии – информативный и доступный диагностический инструмент. Однако он имеет такие недостатки, как кратковременность записи и снятие ЭКГ в состоянии покоя.

Системы длительного кардиомониторирования [1] расширяют диагностические возможности и позволяют отследить функционирование сердца в динамике, а также выявить нарушения сердечного ритма, имеющие преходящий характер, дать им качественную и количественную оценки и проконтролировать эффективность антиаритмической терапии, что невозможно достичь классическим методом регистрации ЭКГ. Такие системы позволяют анализировать работу сердца без обязательного посещения медицинских учреждений, удаленно передавая данные ЭКГ лечащему врачу.

В настоящей работе рассматривается система длительного кардиомониторирования, исключающая имеющиеся недостатки ближайших аналогов и объединяющая их преимущественные показатели.

Анализ систем длительного кардиомониторирования. На сегодняшний день на рынке представлено множество систем длительного кардиомониторирования, отличающихся друг от друга как конструктивно, так и по функциональным возможностям. Такие устройства, как комплекс суточного мониторирования ЭКГ «Валента» [2], холтер ИН-33М [3], холтер «Кардиотехника-04-8(М)» [4], имеют хорошие технические характеристики и поддерживают регистрацию 12 отведений ЭКГ. Однако ввиду больших массогабаритных показателей блока обработки сигналов и использования длинных объемных проводов, соединяющих блок обработки с электродами, применять их неудобно. Другие системы компактны и удобны в эксплуатации, но их показания нельзя назвать высококачественными по причине их снятия с малого количества отведений. Это не позволяет выявлять все нарушения работы сердечно-сосудистой системы, в частности достоверно распознавать возможную ишемию в различных отделах сердца и определять локализацию желудочковых аритмий. Например, разработанное нательное диагностическое устройство для дистанционного непрерывного мониторинга ЭКГ [5] является компактным, крепится непосредственно в области грудной клетки без использования длинных проводов, но при этом имеет ограниченные диагностические возможности, так как позволяет регистрировать ЭКГ всего 1-2 стандартных отведения. Аналогичные недостатки имеют портативные системы HolterLive [6] и Vittapio Holter Кардисенс-2 [7], регистрирующие только 3 и 7 отведений ЭКГ соответственно.

Конструкция эластичных межсоединений. Важной конструктивной особенностью носимых устройств для биомедицинского применения является неплоскостность сборки, так как изделие должно следовать неровным формам в месте крепления. В рас-

сматриваемой конструкции это область грудной клетки человека. Размещение устройства должно минимально ограничивать движения пациента. Регистрация ЭКГ по стандартным, усиленным и грудным отведениям требует непрерывного электрического контакта с поверхностью кожи в разных точках грудной клетки. Предлагаемая система длительного кардиомониторирования содержит группу емкостных биосенсоров, установленных между различными нательными точками пациента соответственно тому или иному отведению и соединенных с основным вычислительным модулем через эластичные межсоединения.

При формировании эластичных межсоединений в связи с непластичной природой металлов требуется особая структура проводников [8, 9]. В случае когда соединения выполнены из твердых металлов, геометрия проводников должна быть изогнутой. В работах [10–17] описаны конструктивные и технологические принципы формирования эластичных межсоединений, а также возможные формы проводников для использования в эластичных межсоединениях. Для выбора подходящей формы проводника проведено моделирование структур, представленных на рис. 1. По результатам моделирования установлены точки с наибольшим возникающим напряжением, где повышен риск образования разрывов в металле. Исследование форм проводников и их последующая оценка проведены на основе возникающих напряжений в слое металла при одноосном растяжении проводника (рис. 2).

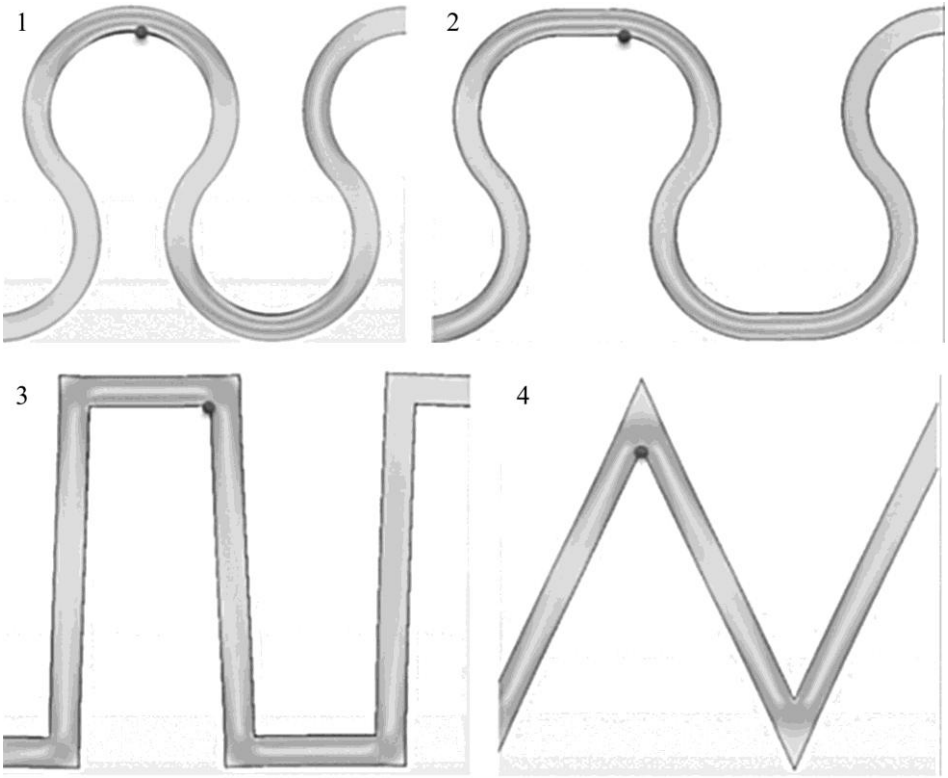


Рис. 1. Формы металлических проводников для моделирования: *1* – подковообразная; *2* – подковообразная с прямоугольными вставками; *3* – прямоугольный меандр; *4* – треугольная

Fig. 1. Selected shapes of metal conductors for modeling: *1* – horseshoe; *2* – horseshoe with rectangular inserts; *3* – rectangular meander; *4* – triangular

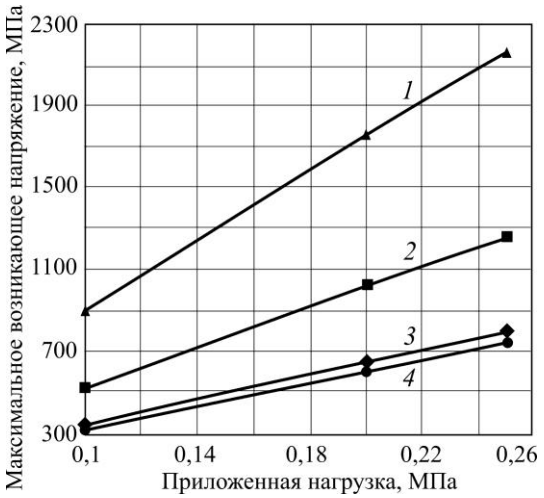


Рис. 2. Зависимость максимальных возникающих напряжений от приложенных нагрузок в проводниках разной формы: *1* – треугольная; *2* – прямоугольный меандр; *3* – подковообразная с прямоугольными вставками; *4* – подковообразная
Fig. 2. Dependence of maximum arising stresses on applied loads in conductors of different shapes: *1* – triangular; *2* – rectangular meander; *3* – horseshoe with rectangular inserts; *4* – horseshoe

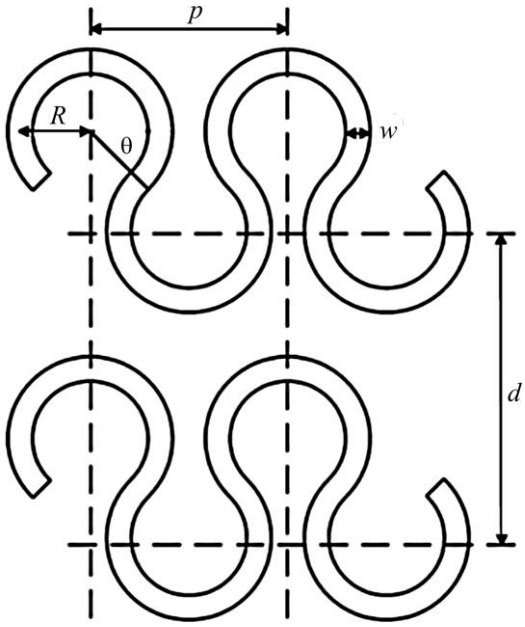


Рис. 3. Проводники в виде скругленных меандров
Fig. 3. Conductors in the form of rounded meanders

На основании полученных результатов исследования установлено, что форма проводников в виде скругленных меандров (рис. 3) наиболее подходящая с механической точки зрения. Это объясняется тем, что при продольных растяжениях по оси *x* данная форма проводника имеет наименьшие показатели возникающих напряжений в слое металла. В связи с этим в рамках разрабатываемой системы кардиомониторирования решено использовать именно эту форму проводников межсоединений.

Геометрические показатели проводников в виде скругленных меандров следующие:

Количество параллельных дорожек на эластичном межсоединении 4
Шаг параллельных дорожек *d* ..... 3 мм
Ширина дорожки меандра *w* ..... 0,1 мм
Угол меандра θ ..... 135°
Радиус меандра *R* ..... 0,35 мм
Период меандра *p* ..... 1 мм
Толщина эластичного материала ..... 0,7 мм

Растяжение проводника, выполненного скругленным меандром в полностью растянутом состоянии, определяется выражением

$$\varepsilon\left(\theta, \frac{L}{R}\right) = \frac{2\theta + \frac{L}{R}}{2\sin\theta + \frac{L}{R}\cos\theta} - 1,$$

где L – длина прямого участка проводника [18].

Принцип работы системы. На рис. 4 представлена структурная блок-схема разработанной системы кардиомониторирования. Принцип работы данной системы заключается в следующем. В области грудной клетки человека, в местах, соответствующих тому или иному отведению, расположена группа емкостных биосенсоров [19], основную

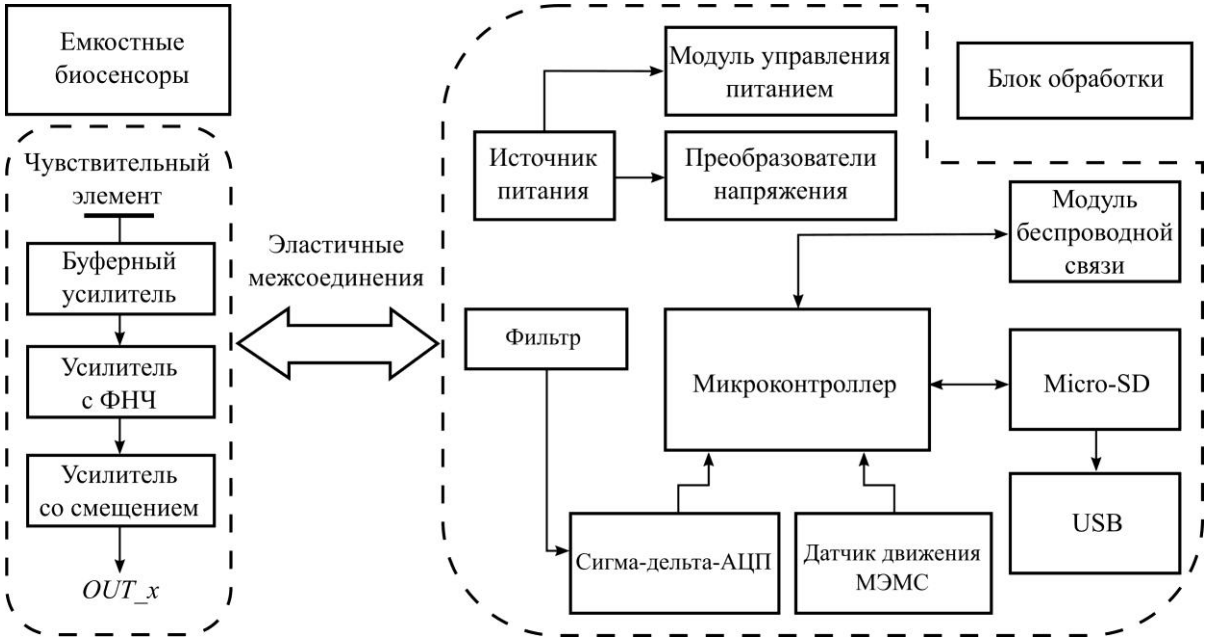


Рис. 4. Структурная блок-схема системы кардиомониторирования
Fig. 4. Structural block diagram of the cardiac monitoring system

роль в которых выполняет чувствительный элемент, улавливающий малейшие биоэлектрические импульсы при работе миокарда. Для минимизации потери данных на пути к устройству обработки на уровне емкостного биосенсора реализован усилительный каскад, задача которого заключается в фильтрации воздействующих внешних помех и усилении выходного сигнала до нужного значения. Усиленный выходной сигнал с каждого датчика посредством эластичных межсоединений поступает в устройство обработки, задача которого – прием и фильтрация выходных сигналов с биосенсоров, последующая обработка данных и построение синхронизированной ЭКГ со всех требуемых грудных отведений.

Устройство обработки состоит из двух модулей: питания и обработки. Модуль питания отвечает за формирование вторичного питания от встроенного литий-полимерного аккумулятора за счет применения понижающих преобразователей напряжения, обеспечивающих выходные напряжения питания, необходимые для всех основных узлов системы. Для удобства эксплуатации на уровне данного модуля реализовано зарядное устройство, процесс работы которого можно отслеживать по индикации соответствующих светодиодов. Предусмотрены контроль остановки подачи внешнего питания на аккумуляторную батарею и защита от статического разряда. Это необходимо для повышения общего времени работоспособности литий-полимерного аккумулятора и его защиты в случае как полного заряда, так и переразряда последнего при длительном простое. Применяемый на борту внешний micro-USB-разъем одновременно служит для подачи внешнего питания на аккумуляторную батарею через управляющий контроллер заряда и в случае необходимости для взаимодействия и обмена данными между персональным компьютером и устройством обработки по протоколу USB 2.0. Модуль обработки является основным вычислительным ядром всей системы кардиомониторирования. На его борту применен 8-канальный сигма-дельта-АЦП, задача которого – измерять сигналы с емкостных биосенсоров, поступающих на входы преобразователя через входные RLC-фильтры, дифференцировать их относительно друг друга и передавать полученные данные ЭКГ со всех 12 отведений на микроконтроллер по

SPI-протоколу. За счет применения на уровне модуля обработки высокоточного МЭМС-акселерометра в течение всего времени измерения ЭКГ пользователя отслеживается изменение положения его тела с частотой порядка 1 Гц для последующего сопоставления с данными ЭКГ в микроконтроллере.

Основным управляющим звеном в модуле обработки выступает микроконтроллер STM32WB55 компании STMicroelectronics. Данная интегральная схема поддерживает необходимое количество протоколов передачи данных, оснащена встроенным Bluetooth-модулем стандарта 5.0 и имеет очень низкое энергопотребление. Микроконтроллер отвечает за управление питанием АЦП, всех емкостных биосенсоров, датчика положения и внутренней энергонезависимой памяти, выполняет цифровую обработку сигналов, полученных от аналого-цифрового преобразователя (АЦП), формирует пакет данных об ЭКГ и передает его на micro-SD-карту – внутреннее хранилище данных с возможностью прямого извлечения из модуля обработки. Для сигнализирования о текущем состоянии работы системы, имеющихся ошибках, уровне заряда аккумуляторной батареи и т. д. на уровне модуля обработки предусмотрена индикация.

В модуле обработки реализовано несколько способов передачи данных ЭКГ на внешние устройства. Обмен данными по протоколу USB 2.0 с персональным компьютером осуществляется по кабелю через встроенный micro-USB-разъем. Имеется возможность изъятия micro-SD-карты из модуля обработки для передачи данных напрямую. В модуле обработки предусмотрено беспроводное сопряжение с мобильными устройствами. На уровне микроконтроллера имеется встроенный Bluetooth-модуль стандарта 5.0 с поддержкой протоколов 802.15.4 для удовлетворения широкого спектра приложений. Для реализации беспроводной передачи данных микроконтроллер считывает с micro-SD-карты ранее записанные пакеты данных по SPI-протоколу и далее после их шифрования передает через ряд входных фильтрующих каскадов на керамическую SMD-антенну, позволяющую реализовать качественное беспроводное соединение с принимающим устройством с минимизацией потерь данных на стороне приема.

Конструкция системы кардиомониторирования. На рис. 5 представлена конструкция разработанной системы кардиомониторирования. Конструктивная особенность устройства обработки подразумевает расположение его модулей в отдельном корпусе, каждый из которых, в свою очередь, состоит из основания и верхней крышки. В первом модуле обработки печатная плата фиксируется на внутренних выступах основания. Помимо этого, в основании и верхней крышке предусмотрены небольшие цилиндрические выступы, прижимающие печатную плату. Второй модуль имеет аналогичные первому методы корпусирования, а печатная плата и аккумулятор располагаются на основании. В каждом модуле предусмотрены вырезы под соответствующие внешние разъемы, индикаторы, а также подпружиненные контакты, отвечающие за обеспечение качественного электрического контакта между модулями обработки и питания. Соединение основания и крышки каждого модуля, а также самих

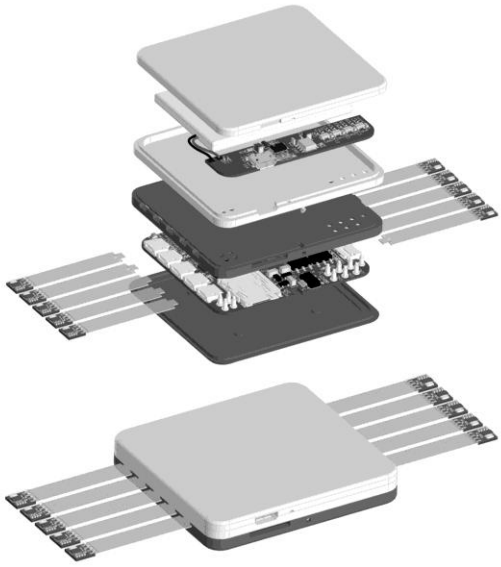


Рис. 5. Конструкция системы кардиомониторирования
Fig. 5. Cardiac monitoring system design

модулей между собой обеспечивается за счет предусмотренных в конструкции направляющих вырезов по краям деталей обоих модулей и центральной защелки. Габариты разработанного устройства 60 × 55 × 9,3 мм. На рис. 6 представлен фрагмент конструкции эластичного межсоединения, подсоединенного к емкостному биосенсору.

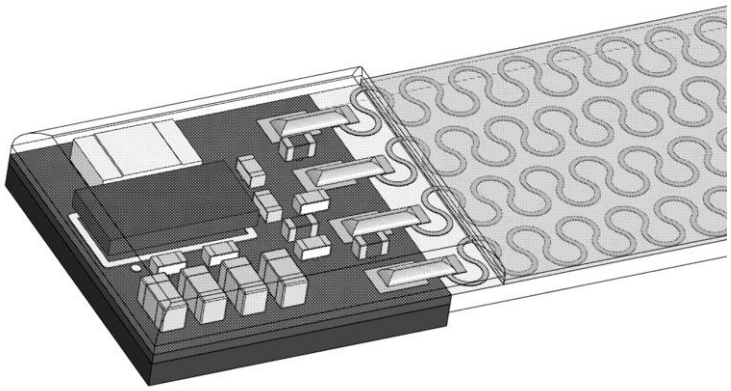


Рис. 6. Фрагмент конструкции эластичного межсоединения, подсоединенного к емкостному биосенсору
Fig. 6. Fragment of the design of the stretchable interconnection connected to the capacitive biosensor

Результаты и их обсуждение. По результатам проведенного моделирования программной фильтрации сигнала ЭКГ установлена необходимая схема фильтрации для выделения полезного сигнала ЭКГ: фильтр верхних частот (ФВЧ) для устранения высокочастотных (ВЧ) шумов, полосно-заграждающий фильтр (ПЗФ) для устранения шума электросети, фильтр низких частот (ФНЧ) для устранения дрейфа изолинии из-за низкочастотных (НЧ) помех [20]. На рис. 7 изображен исходный сигнал ЭКГ, проходящий после наложения разнородного шума все этапы фильтрации. В результате удается убрать шумы и выделить полезный сигнал ЭКГ.

Проведено моделирование конструкции на тепловыделение. При существенных упрощениях конструкции устройства обработки и сложной геометрии электрорадиоизделий выполнен тепловой расчет двух режимов работы исследуемого изделия. В первом случае устройство обработки функционирует в штатном режиме, осуществляя питание всех основных узлов системы от литий-полимерного аккумулятора (рис. 8, *а*). Во втором случае промоделирован наихудший вариант работы изделия, подразумевающий параллельный заряд аккумуляторной батареи устройства обработки во время работы последнего в штатном режиме (рис. 8, *б*, *в*).

Тепловой анализ работы исследуемой системы в штатном режиме показал незначительный прирост температуры нагрева от работающих электрорадиоизделий, не превышающий 2 °С относительно температуры окружающей среды. В режиме работы изделия, подразумевающем параллельный заряд аккумуляторной батареи, установлен существенный прирост максимальной температуры нагрева, соответствующий ≈ 46 °С. Однако внешнее воздействие окружающей среды при температуре 22 °С и качественное распределение тепла по поверхности печатной платы и корпуса полностью нивелируют данный нагрев, тем самым устройство обработки продолжает функционировать на низких температурах, близких к температуре окружающей среды. Результаты проведенного теплового анализа подтверждают, что при эксплуатации разработанной системы кардиомониторирования обеспечивается комфортный температурный режим системы, отвечающий требуемым нормам.

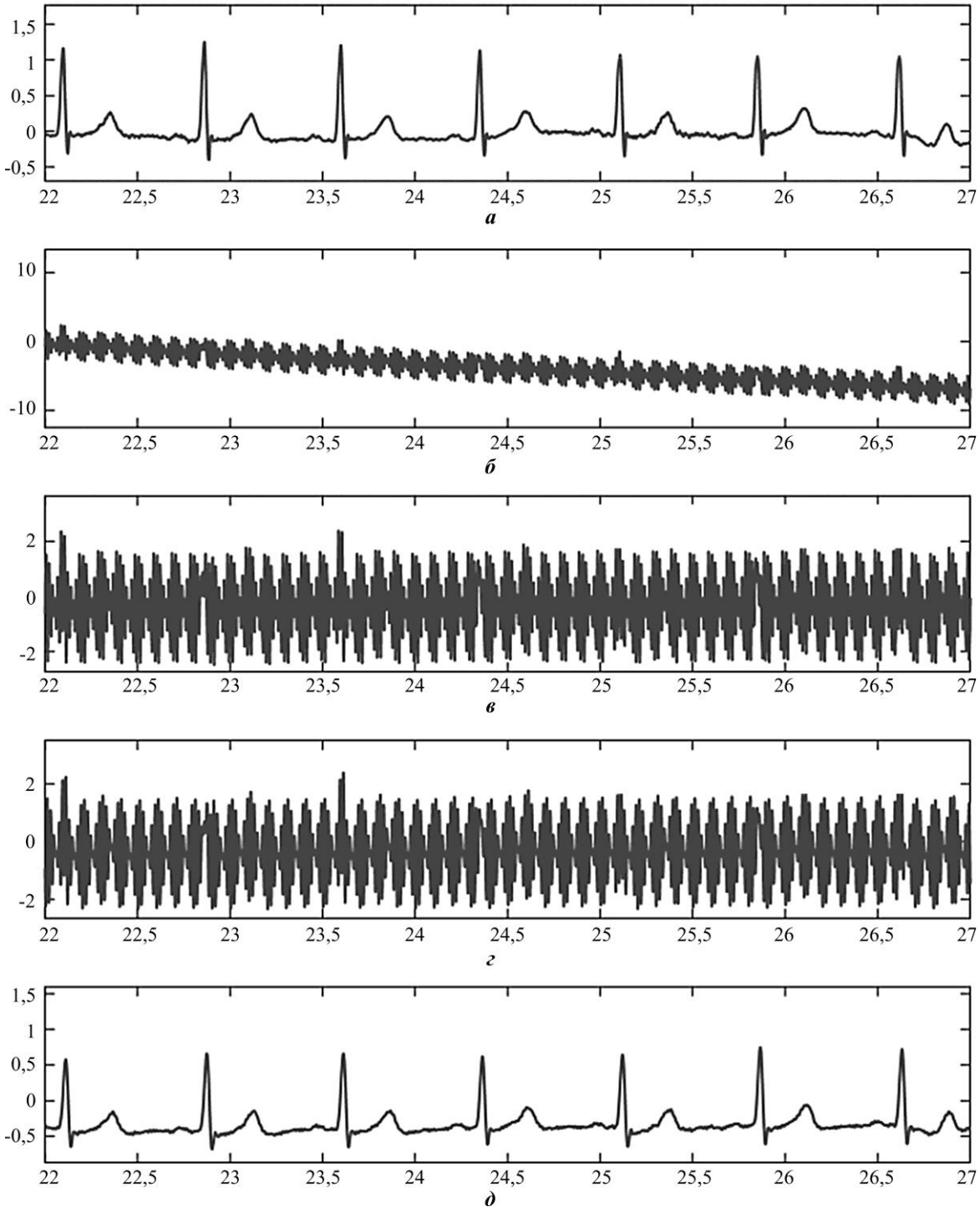


Рис. 7. Влияние разнородных шумов на сигнал ЭКГ и результат их фильтрации: *а* – оригинальный сигнал; *б* – сигнал с шумами; *в* – сигнал на выходе ФВЧ; *г* – сигнал на выходе ФВЧ + ФНЧ; *д* – сигнал на выходе ФВЧ+ ФНЧ + ПЗФ

Fig. 7. Effect of heterogeneous noise on the ECG signal and the result of their filtering: *a* – original signal; *b* – noisy signal; *c* – high pass filter output signal; *d* – high pass filter + low pass filter output signal; *e* – high pass filter + low pass filter + band-stop filter output signal

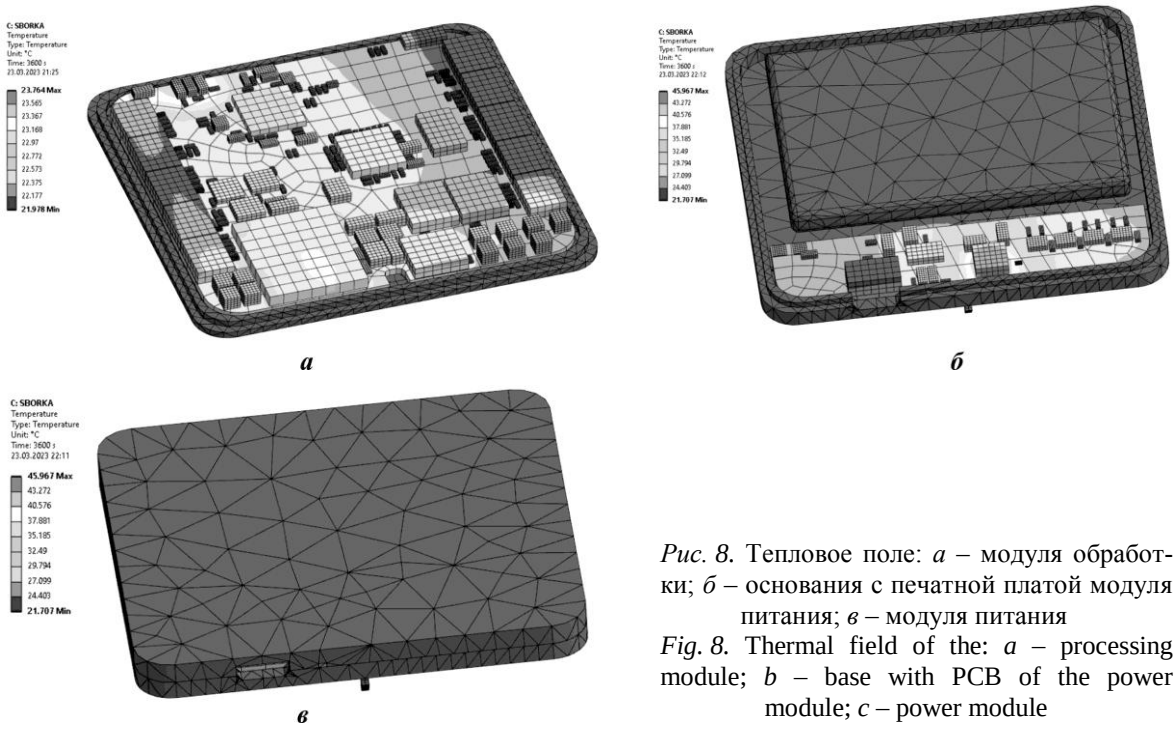


Рис. 8. Тепловое поле: *а* – модуля обработки; *б* – основания с печатной платой модуля питания; *в* – модуля питания

Fig. 8. Thermal field of the: *a* – processing module; *b* – base with PCB of the power module; *c* – power module

Разработанная система позволяет снимать показания ЭКГ с 12 грудных отведений и имеет следующие характеристики:

Частота дискретизации..... 1000 Гц
Разрядность АЦП.....24 бит
Время автономной работы системы
от одной аккумуляторной батареи ..... ≈ 51 ч
Масса блока обработки .....≈ 48 г
Масса емкостного биосенсора.....≈ 0,4 г
Габариты блока обработки ..... 60 × 55 × 9,3 мм
Габариты биосенсоров ..... 6 × 6 × 1,37 мм

Длина соединений между блоком обработки и емкостными биосенсорами уменьшена до 30 см за счет использования эластичных шлейфов и размещения блока обработки в области грудной клетки человека.

Заключение. Разработанная система длительного кардиомониторирования с применением эластичных межсоединений, представляющих собой новый способ соединения емкостных биосенсоров, основанных на бесконтактном способе измерения электрических потенциалов с поверхности кожи человека, и устройства обработки с возможностью передачи данных ЭКГ на внешние носители и с помощью беспроводных технологий обладает низкими массогабаритными показателями и позволяет осуществлять регистрацию ЭКГ с 12 стандартных отведений. Такая комбинация в итоге должна повысить уровень комфорта пациента при проведении длительного кардиомониторирования. При этом остаются расширенные диагностические возможности для выявления различных сердечно-сосудистых заболеваний.

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

Литература

1. Пат. 220696 РФ. Носимое устройство для непрерывного кардиомониторинга / ***Н. С. Горлов, В. Р. Погодин, Ф. Б. Лазба***; заявл. 22.03.2023; опубл. 28.09.2023, Бюл. № 28. 7 с. EDN: PBLHJO.

2. Регистрационное удостоверение на медицинское изделие «Комплекс суточного мониторирования ЭКГ и АД “Валента”» от 16.01.2023 № ФСР 2007/00260 // Валента [Электронный ресурс]. URL: http://valenta.spb.ru/download/sert/KCM_reg.pdf (дата обращения: 17.01.2024).

3. Холтер ИН-33М // МЕДИКОМ [Электронный ресурс]. URL: https://www.medicomholter.ru/holter-33m (дата обращения: 17.01.2024).

4. Полный холтер «КАРДИОТЕХНИКА-04-8(М)» // Институт кардиологической техники «ИНКАРТ» [Электронный ресурс]. URL: https://www.incart.ru/production/kt-04/kt-04-8-m/ (дата обращения: 17.01.2024).

5. Пат. 2675752 РФ. Нательное диагностическое устройство для дистанционного непрерывного мониторинга электрокардиограммы (ЭКГ) / ***Е. А. Карпов, Д. Е. Карпов***; заявл. 22.12.2016; опубл. 24.12.2018, Бюл. № 18. 16 с. EDN: KWOETP.

6. Регистрационное удостоверение на медицинское изделие «Комплекс аппаратно-программный суточного мониторирования ЭКГ по Холтеру “HOLTERLIVE” с возможностью проведения дистанционного анализа ЭКГ» от 29.07.2019 № РЗН 2019/8693 // HOLTERLIVE [Электронный ресурс]. URL: https://holterlive.ru/wp-content/uploads/2019/08/RU-RZN-20198693-ot-29.07.2019.pdf (дата обращения: 19.01.2024).

7. Пат. 176906 РФ. Устройство дистанционного непрерывного мониторинга физиологических параметров человека / ***А. Г. Армаганов, О. В. Дишунян***; заявл. 06.10.2017; опубл. 01.02.2018, Бюл. № 4. 8 с. EDN: BAEAHG.

8. ***Brosteaux D., Axisa F., Gonzalez M., Vanfleteren J.*** Design and fabrication of elastic interconnections for stretchable electronic circuits // IEEE Electron Device Letters. 2007. Vol. 28. Iss. 7. P. 552–554. https://doi.org/10.1109/LED.2007.897887

9. ***Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П.*** Эластичные основания и межсоединения в носимой биоэлектронике и перспективы их применения // Научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы и микросистемная техника»: сб. трудов. М.: МИЭТ, 2022. С. 112–118. EDN: LWHNEW.

10. Patent 2010/086416 WO. Stretchable electronic device / ***J. Vanfleteren, F. Bossuyt, F. Axisa***; filed 29.01.2010, publ. 05.08.2010. 61 p.

11. Patent 2020/018255 WO. Stretchable electronics and hybrid integration method for fabricating the same / ***Z. Yuan, J. Kang, X. Guan, P. Wei***; filed 28.06.2019; publ. 23.01.2020. 37 p.

12. Patent 0358849 US. Flexible interconnects, systems, and uses thereof / ***J. S. Jur, M. Yokus, R. Foote et al.***; filed: 06.06.2016; publ.: 08.12.2016. 59 p.

13. Patent 0243204 US. Stretchable polymer-based electronic device / ***M. N. Maghribi, P. A. Krulevitch, J. C. Davidson et al.***; filed: 16.04.2004; publ.: 02.12.2004. 13 p.

14. ***Ponomarev N. A., Vertyanov D. V., Nikolaev V. M., Timoshenkov S. P.*** Research of the constructions of conductors on flexible carriers // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). Moscow; St. Petersburg: IEEE, 2018. P. 1626–1630. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317412

15. Impact of geometry on stretchable meandered interconnect uniaxial tensile extension fatigue reliability / ***M. Jablonski, R. Lucchini, F. Bossuyt et al.*** // Microelectronics Reliability. 2014. Vol. 55. Iss. 1. P. 143–154. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.09.009

16. Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits / ***M. Gonzalez, F. Axisa, M. V. Bulcke et al.*** // Microelectronics Reliability. 2008. Vol. 48. Iss. 6. P. 825–832. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.03.025

17. ***Verplancke R., Sterken T., Axisa F., Vanfleteren J.*** Development of a thin-film stretchable electrical interconnection technology for biocompatible applications // 3rd Electronics System Integration Technology Conference (ESTC). Berlin: IEEE, 2010. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/ESTC.2010.5642910

18. ***Hocheng H., Chen C.-M.*** Design, fabrication and failure analysis of stretchable electrical routings // Sensors. 2014. Vol. 14. Iss. 7. P. 11855–11877. https://doi.org/10.3390/s140711855

19. ***Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П.*** Емкостной биосенсор для измерения электрических потенциалов // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № S8-2 (113). С. 429–436. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.429.436. – EDN: SVRFSW.

20. Review of noise removal techniques in ECG signals / ***S. Chatterjee, R. S. Thakur, R. N. Yadav et al.*** // IET Signal Processing. 2020. Vol. 14. Iss. 9. P. 569–590. https://doi.org/10.1049/iet-spr.2020.0104

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 06.12.2023 г.;
принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Горлов Николай Сергеевич – аспирант, инженер Учебно-научного центра проектирования «Mentor Graphics – МИЭТ» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gorlov.nikolai.s@mail.ru

Вертянов Денис Васильевич – кандидат технических наук, доцент, начальник Научно-исследовательской лаборатории передовых технологий корпусирования и производства 3D-микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vdv.vertyanov@gmail.com

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

Погодин Владислав Романович – инженер-электроник отдела разработки технологической, испытательной и отладочной аппаратуры АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5. стр. 2), komok11123@gmail.com

Лазба Филипп Борисович – магистрант, инженер-радиоэлектронщик НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lazfilip@gmail.com

References

1. Gorlov N. S., Pogodin V. R., Lazba F. B. *Wearable device for continuous cardiac monitoring.* Patent 220696 RF, publ. 28.09.2023, Bul. no. 28. 7 p. (In Russian). EDN: PBLHJO.

2. Certificate of registration for the medical product “Complex of daily monitoring of ECG and blood pressure ‘Valenta’ ” of Jan. 16, 2023 no. FSR 2007/00260. *Valenta.* (In Russian). Available at: http://valenta.spb.ru/download/sert/KCM_reg.pdf (accessed: 17.01.2024).

3. Holter IN-33M. *MEDICOM.* (In Russian). Available at: https://www.medicomholter.ru/holter-33m (accessed: 17.01.2024).

4. Complete Holter “KARDIOTEKHNIKA-04-8(M)”. *Institut kardiologicheskoy tekhniki “INKART”.* (In Russian). Available at: https://www.incart.ru/production/kt-04/kt-04-8-m/ (accessed: 17.01.2024).

5. Karpov E. A., Karpov D. E. *Wearable diagnostic device for remote continuous monitoring of electrocardiogram (ECG).* Patent 2675752 RF, publ. 24.12.2018, Bul. no. 18. 16 p. (In Russian). EDN: KWOETP.

6. Certificate of registration for the medical product “Hardware-software complex for 24-hour Holter ECG monitoring ‘HOLTERLIVE’ with the ability to conduct remote ECG analysis” of July 29, 2019, no. RZN 2019/8693. *HOLTERLIVE.* (In Russian). Available at: https://holterlive.ru/wp-content/uploads/2019/08/RU-RZN-20198693-ot-29.07.2019.pdf (accessed: 19.01.2024).

7. Armaganov A. G., Dshkhunyan O. V. *Device for remote continuous monitoring of human physiological parameters.* Patent 176906 RF, publ. 01.02.2018, Bul. no. 4. 8 p. (In Russian). EDN: BAEAHG.

8. Brosteaux D., Axisa F., Gonzalez M., Vanfleteren J. Design and fabrication of elastic interconnections for stretchable electronic circuits. *IEEE Electron Device Letters,* 2007, vol. 28, iss. 7, pp. 552–554. https://doi.org/10.1109/LED.2007.897887

9. Gorlov N., Vertyanov D., Timoshenkov S. Stretchable substrates and interconnections in wearable bioelectronics and prospects for their application. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Intellektual’nyye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika”,* proceedings. Moscow, MIET, 2022, pp. 112–118. (In Russian). EDN: LWHNEW.

10. Vanfleteren J., Bossuyt F., Axisa F. *Stretchable electronic device.* Patent 2010/086416 WO, publ. 05.08.2010. 61 p.

11. Yuan Z., Kang J., Guan X., Wei P. *Stretchable electronics and hybrid integration method for fabricating the same.* Patent 2020/018255 WO, publ. 23.01.2020. 37 p.

12. Jur J. S., Yokus M., Foote R., Myers A. C., Bhakta R. P. *Flexible interconnects, systems, and uses thereof.* Patent 0358849 United States, publ. 08.12.2016. 59 p.

13. Maghribi M. N., Krulevitch P. A., Davidson J. C., Wilson Th. S., Hamilton J. K., Benett W. J., Tovar A. R. *Stretchable polymer-based electronic device.* Patent 0243204 United States, publ. 02.12.2004. 13 p.

14. Ponomarev N. A., Vertyanov D. A., Nikolaev V. M., Timoshenkov S. P. Research of the constructions of conductors on flexible carriers. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).* Moscow, St. Petersburg, IEEE, 2018, pp. 1626–1630. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317412

15. Jablonski M., Lucchini R., Bossuyt F., Vervust T., Vanfleteren J., Vries J. W. C. de, Vena P., Gonzalez M. Impact of geometry on stretchable meandered interconnect uniaxial tensile extension fatigue reliability. *Microelectronics Reliability,* 2014, vol. 55, iss. 1, pp. 143–154. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.09.009

16. Gonzalez M., Axisa F., Bulcke M. V., Brosteaux D., Vandevelde B., Vanfleteren J. Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits. *Microelectronics Reliability,* 2008, vol. 48, iss. 6, pp. 825–832. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.03.025

17. Verplancke R., Sterken T., Axisa F., Vanfleteren J. Development of a thin-film stretchable electrical interconnection technology for biocompatible applications. *3rd Electronics System Integration Technology Conference (ESTC).* Berlin, IEEE, 2010, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ESTC.2010.5642910

18. Hocheng H., Chen C.-M. Design, fabrication and failure analysis of stretchable electrical routings. *Sensors,* 2014, vol. 14, iss. 7, pp. 11855–11877. https://doi.org/10.3390/s140711855

19. Gorlov N. S., Vertyanov D. V., Timoshenkov S. P. Capacitive biosensor for measuring electrical potentials. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2022, vol. 15, no. S8-2 (113), pp. 429–436. (In Russian). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.429.436. – EDN: SVRFSW.

20. Chatterjee S., Thakur R. S., Yadav R. N., Gupta L., Raghuvanshi D. K. Review of noise removal techniques in ECG signals. *IET Signal Processing,* 2020, vol. 14, iss. 9, pp. 569–590. https://doi.org/10.1049/iet-spr.2020.0104

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 06.12.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Nikolai S. Gorlov – PhD student, Engineer of the Educational and Scientific Design Center "Mentor Graphics – MIET", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gorlov.nikolai.s@mail.ru

Denis V. Vertyanov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Research Laboratory of Advanced Technologies for Packaging and Production of 3D Microsystems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vdv.vertyanov@gmail.com

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

Vladislav R. Pogodin – Electronics Engineer of the Development of Technological, Testing and Debugging Equipment Department, "Submicron Research Institute" JSC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5, bld. 2), komok11123@gmail.com

Filipp B. Lazba – Graduate student, Radio Electronics Engineer of the Research Institute of Computing and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), lazfilip@gmail.com

Научная статья
УДК 612.117.5: 535.343.9
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-223-235
EDN: JNXARM

Мониторинг оксигенации гемоглобина с помощью прибора NIRS4 и разработанного алгоритма

Д. А. Буянов[1,2], П. В. Шалаев[3], П. А. Монахова[1,3], А. Ю. Герасименко[1,4]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]ООО «Медицинские Компьютерные Системы», г. Москва, Россия
[3]ООО «Айвок», г. Москва, Россия
[4]Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия

gerasimenko@bms.zone

Аннотация. Носимые устройства, осуществляющие непрерывное наблюдение за физиологическими сигналами организма, позволяют диагностировать и лечить заболевания, а также повышать эффективность физических нагрузок. При измерении количественных показателей методом ближней ИК-спектроскопии возникает проблема, связанная с неопределенностью оптической длины оптического пути. Без знания оптической длины невозможно получить точные значения, поэтому количественными показателями будут относительные концентрации гемоглобина, выражающиеся в условных единицах. В работе выполнены сравнительная оценка и анализ результатов измерения оксигенации гемоглобина с помощью прибора NIRS4 и разработанного алгоритма. Описаны проведенные эксперименты по определению индекса оксигенации. Установлено, что измеренные значения для каждой фракции гемоглобина соответствуют известным значениям, а расчет концентрации оксигенированного гемоглобина с использованием разработанного метода дает изменения в концентрации того же порядка, что и типичные данные для других методов и приборов. Результаты исследования могут использоваться для ранней диагностики биохимической активности организма. Это открывает новые возможности для развития методов диагностики и контроля состояния здоровья на основе показателей концентрации гемоглобина в крови.

Ключевые слова: ближняя ИК-спектроскопия, оптическая тканевая оксиметрия, оксигенация тканей, сатурация

Финансирование работы: работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Для цитирования: Буянов Д. А., Шалаев П. В., Монахова П. А., Герасименко А. Ю. Мониторинг оксигенации гемоглобина с помощью прибора NIRS4 и разработанного алгоритма // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 223–235. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-223-235. – EDN: JNXARM.

© Д. А. Буянов, П. В. Шалаев, П. А. Монахова, А. Ю. Герасименко, 2024

Original article

Monitoring of hemoglobin oxygenation using the NIRS4 device and the developed algorithm

D. A. Buyanov[1,2], P. V. Shalaev[3], P. A. Monakhova[1,3], A. Yu. Gerasimenko[1,4]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]"Medical Computer Systems" LLC, Moscow, Russia
[3]"Aivok" LLC, Moscow, Russia
[4]I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

gerasimenko@bms.zone

Abstract. Wearable devices that continuously monitor the physiological signals of the body allow the diagnosis and treatment of diseases, as well as the increase of physical activity effectiveness. During quantitative measurements by near infrared spectroscopy a problem arises related to indefiniteness of optical length of optical pathway. Without knowing optical length, it is impossible to obtain precise values, hence quantitative indicators will be relative concentrations of hemoglobin in terms of relative units. In this work, a comparative assessment and analysis of the results of measuring hemoglobin oxygenation using the NIRS4 device and the developed algorithm were conducted. Experiments conducted to determine the oxygenation index are described. It was found that the measured values for each hemoglobin fraction correspond to known values, and the calculation of the oxygenated hemoglobin concentration using the developed method gives changes in concentration of the same order as typical data for other methods and devices.The results of the study can be used for early diagnosis of the biochemical activity of the body. This opens new opportunities for the development of methods for diagnosing and monitoring health status based on indicators of hemoglobin concentration in the blood.

Keywords: near infrared spectroscopy, optical tissue oximetry, tissue oxygenation, saturation

Funding: the work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project FSMR-2024-0003).

For citation: Buyanov D. A., Shalaev P. V., Monakhova P. A., Gerasimenko A. Yu. Monitoring of hemoglobin oxygenation using the NIRS4 device and the developed algorithm. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 223–235. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-223-235. – EDN: JNXARM.

Введение. Использование носимых устройств, или биосенсоров, позволяющих осуществлять непрерывный мониторинг физиологических сигналов, имеет большое значение для повышения активности физических нагрузок, а также для диагностики и лечения заболеваний [1]. Как правило, используются такие показатели, как частота сердечного ритма, концентрация молочной кислоты в крови или максимальный уровень потребления кислорода. Данные показатели помогают определить интенсивность, при которой достигаются лучшие результаты, но не учитывают информацию о работающих мышцах. В связи с этим

растет интерес к изучению насыщения мышц кислородом, так как этот параметр может обеспечить непрерывное локальное измерение с помощью ближней ИК-спектроскопии. Данный метод является неинвазивным и может предоставлять функциональную информацию об окислительном метаболизме скелетных мышц во время физических упражнений у здоровых и клинических пациентов [2], а также выступать показателем продуктивной деятельности человека [3]. Проблема, которая возникает при измерении количественных показателей методом ближней ИК-спектроскопии, связана с неопределенностью оптической длины оптического пути в модифицированном законе Бугера – Ламберта – Бера [4]. Так как без знания оптической длины невозможно получить точные значения, количественными показателями будут являться относительные концентрации гемоглобина, которые обычно выражаются в условных единицах. Для этого необходимо использовать специальные алгоритмы обработки данных.

Для измерения показателей оксигенации гемоглобина предназначен прибор NIRS4, который работает в ИК-диапазоне 700–900 нм и используется для измерения концентрации оксигенированного гемоглобина (оксигемоглобина) HbO_2 и дезоксигенированного гемоглобина (дезоксигемоглобина) Hb. Этот диапазон называется окном прозрачности (свет легко проникает сквозь ткани). Гемоглобин и другие органические соединения поглощают свет с длиной волны менее 700 нм, а вода – с длиной волны более 900 нм. Таким образом, поглощение света в диапазоне 700–900 нм зависит от концентрации оксигемоглобина и дезоксигемоглобина. Если известны коэффициенты поглощения этих веществ, то появляется возможность рассчитать изменение концентрации на основе изменения поглощения в двух характерных точках спектра.

Цель настоящей работы – экспериментальная валидация функционирования прибора NIRS4 для измерения индекса оксигенации и сравнение получаемых с его помощью результатов с аналогами.

Методы исследования. Прибор NIRS4 использовали для регистрации рассеянного светового излучения. Устройство состоит из трехчастотного светодиодного излучателя с длинами волн 770, 810, 850 нм и четырех приемников света, расположенных на гибких штативах вокруг излучателя и на некотором расстоянии от него для обеспечения равномерного распределения света по всей поверхности объекта. Излучатель находится в центре устройства.

В работе [5] предложен алгоритм измерения абсолютных и относительных концентраций оксигенированных и дезоксигенированных форм гемоглобина на основе модифицированного закона Бугера – Ламберта – Бера с помощью прибора NIRS4. Представленная модель основана на предварительном использовании фантомов, имитирующих рассеивающие биологические объекты с известными оптическими свойствами, для калибровки прибора. Согласно предложенной эмпирической модели абсолютная концентрация дезоксигенированной C_{Hb} и оксигенированной $C_{\mathrm{HbO_2}}$ форм гемоглобина определяется следующим образом:

$$\begin{cases} C_{\mathrm{Hb}} = \dfrac{1}{r_{SD}} \dfrac{1}{DPF} \dfrac{\varepsilon_{\mathrm{HbO_2}}^{770}\left(-\ln\dfrac{I^{850}}{I_0^{850}} - \tilde{G}^{850}\right) - \left(-\ln\dfrac{I^{770}}{I_0^{770}} - \tilde{G}^{770}\right)\varepsilon_{\mathrm{HbO_2}}^{850}}{\varepsilon_{\mathrm{HbO_2}}^{770}\varepsilon_{\mathrm{Hb}}^{850} - \varepsilon_{\mathrm{Hb}}^{770}\varepsilon_{\mathrm{HbO_2}}^{850}}, \\ C_{\mathrm{HbO_2}} = \dfrac{\dfrac{1}{r_{SD}}\dfrac{1}{DPF}\left(-\ln\dfrac{I^{770}}{I_0^{770}} - \tilde{G}^{770}\right) - \varepsilon_{\mathrm{Hb}}^{770} C_{\mathrm{Hb}}}{\varepsilon_{\mathrm{HbO_2}}^{770}}, \end{cases}$$

где r_{SD} – расстояние между источником и приемником излучения; DPF – дифференциальный фактор длины пути; $\varepsilon_{HbO_2}^{770}, \varepsilon_{HbO_2}^{850}, \varepsilon_{Hb}^{770}, \varepsilon_{Hb}^{850}$ – показатели поглощения оксигемоглобина и дезоксигемоглобина на длинах волн 770 нм и 850 нм соответственно; I^{770}, I^{850}, I_0^{770}, I_0^{850} – интенсивность регистрируемого и падающего излучения на длинах волн 770 и 850 нм соответственно; $\tilde{G}^{770}, \tilde{G}^{850}$ – модифицированный фактор ослабления излучения на длинах волн 770 и 850 нм, рассчитанный соответственно на основе измерений фактора ослабления G^{770}, G^{850} на фантомах с известными оптическими свойствами.

При известных концентрациях C_{HbO_2} и C_{Hb} можно определить параметр функциональной сатурации:

$$St_{O_2} = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} 100\,\%.$$

Полученные данные сохраняли в программе LabRecorder, затем обрабатывали с помощью разработанного алгоритма. Предварительная фильтрация исходных данных с применением медианного фильтра позволила устранить возможные искажения, вызванные смещением прибора.

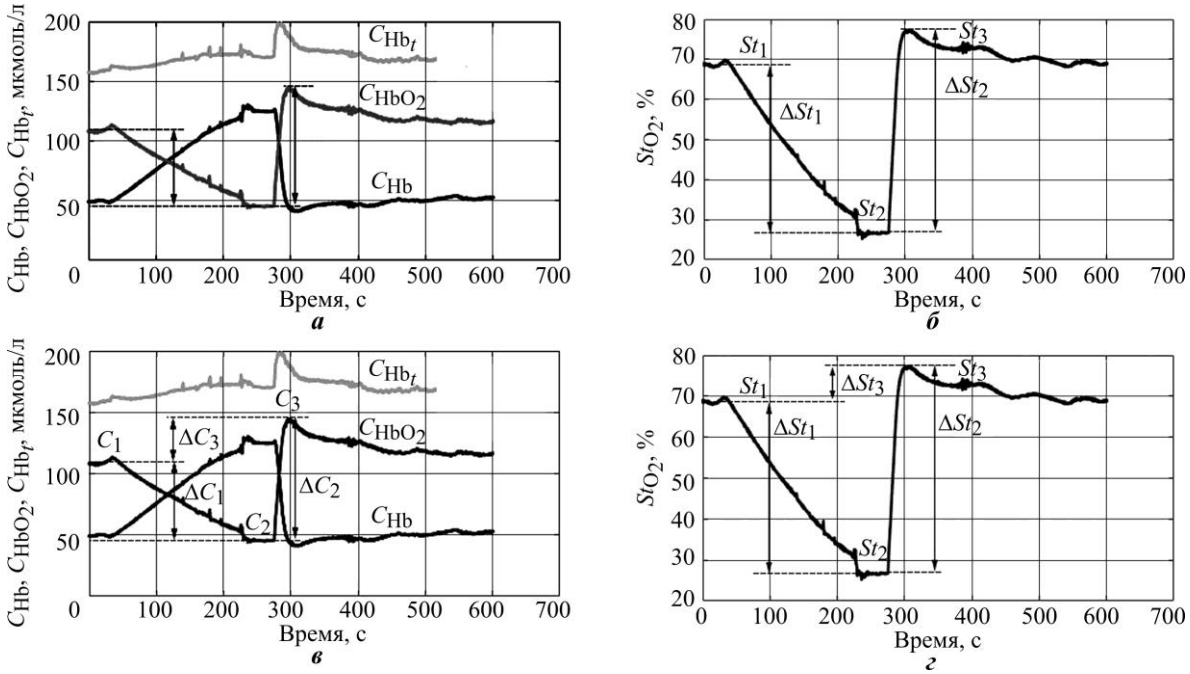


Рис. 1. Изменения концентрации дезоксигемоглобина C_{Hb}, оксигемоглобина C_{HbO_2}, общей концентрации гемоглобина C_{Hb_t} в крови при артериальной окклюзии (*а*), мышечной нагрузке (*в*) и показателя сатурации гемоглобина в крови St_{O_2} при артериальной окклюзии (*б*), мышечной нагрузке (*г*)

Fig. 1. Changes in the concentration of deoxygenated hemoglobin C_{Hb}, oxygenated hemoglobin C_{HbO_2}, total concentration of blood hemoglobin C_{Hb_t} during arterial occlusion (*a*), muscle load (*c*), and hemoglobin saturation in the blood St_{O_2} during arterial occlusion (*b*), muscle load (*d*)

Для сравнения с аналогами рассматривали следующие параметры (рис. 1):

– разница значений концентрации ΔC_1 оксигемоглобина в состоянии покоя и в минимуме, мкмоль/л;

– разница значений концентрации ΔC_2 оксигемоглобина в состоянии гиперкомпенсации и в минимуме, мкмоль/л;

– разница значений сатурации ΔSt_1 оксигемоглобина в состоянии покоя St_1 и в минимуме St_2, %;

– разница значений сатурации ΔSt_2 оксигемоглобина в состоянии гиперкомпенсации St_3 и в минимуме St_2, %.

В случае мышечной нагрузки также учитывали следующие параметры:

– разница значений концентрации ΔC_3 оксигемоглобина в состоянии гиперкомпенсации и покоя, мкмоль/л;

– разница значений сатурации ΔSt_3 оксигемоглобина в состоянии гиперкомпенсации St_3 и покоя St_1, %.

Результаты и их обсуждение. По результатам проведения нескольких экспериментов с применением прибором NIRS4 выявлены следующие особенности изменения оксигенации мышц при артериальной окклюзии и физической нагрузке [6].

Оксигенация при артериальной окклюзии. В табл. 1 представлены значения параметров оксигенации гемоглобина при артериальной окклюзии, полученные с помощью разных приборов.

Таблица 1

Значения характерных параметров оксигенации гемоглобина при артериальной окклюзии

Table 1

Values of characteristic parameters of hemoglobin oxygenation in arterial occlusion

Прибор / Метод измерения	Источник	ΔC_1, мкмоль/л	ΔC_2, мкмоль/л	St_1,%	St_2,%	St_3,%	ΔSt_1, %	ΔSt_2, %
NIRS4 (Medical Computer Systems Ltd., Россия) / Непрерывно-волновой метод	Настоящая работа	63	99	68	26	77	42	51
Time Resolved Spectroscopy / Спектроскопия с временным разрешением	[7]	35	55	83	45	85	38	40
NIRO500 (Hamamatsu Photonics, Япония) / Непрерывно-волновой метод	[8]	33	66	–	–	–	–	–
OMNIA (ISS Inc., США) / Фазовая модуляция	[8]	12	17	–	–	–	–	–
NIRS instrument (Radiometer Medical A/S, Дания)	[9]	35	43	–	–	–	–	–
Custom NIRS device (специальное устройство для NIRS) / Насыщаемость мышц кислородом	[10]	–	–	66	22	71	44	49
Custom NIRS device (специальное устройство для NIRS)	[11]	–	–	75	54	80	21	26
	[12]	–	–	69	14,2	82,8	54,8	68,6
OxiplexTS Oximeter model 96208 (ISS, США) / Метод частотной области, фазовая модуляция	[13]	–	–	64	34	76	30	42
NIR_{TRS} (Hamamatsu Photonics, Япония) / Спектроскопия с временным разрешением	[14]	–	–	60	24	72	36	48

Окончание

Прибор / Метод измерения	Источник	ΔC_1, мкмоль/л	ΔC_2, мкмоль/л	St_1,%	St_2,%	St_3,%	ΔSt_1, %	ΔSt_2, %
Moxy (Fortiori Design LLC, США) / Насыщаемость мышц кислородом	[15]	–	–	55	10	75	45	65
Humon (Dynometrics Inc., США) / Насыщаемость мышц кислородом	[15]	–	–	45	0	65	45	65
PortaMon (Artinis Medical Systems, Нидерланды)	[15]	–	–	70	30	80	40	50

«–» – нет данных.

Из табл. 1 видно, что значения изменения концентрации оксигемоглобина при артериальной окклюзии, полученные с использованием алгоритма и прибора NIRS4, имеют тот же порядок, что и значения, полученные с помощью других приборов и методов измерений. Значения изменения сатурации при артериальной окклюзии, полученные с помощью прибора NIRS4 (ΔSt_1 = 42 %, ΔSt_2 = 51 %), также находятся в хорошем соответствии с усредненными значениями, полученными с помощью других приборов и методов измерений ($\langle\Delta St_1\rangle$ = (39 ± 10) %, $\langle\Delta St_2\rangle$ = (50 ± 13) %).

Оксигенация при нагрузке на мышцы. При нагрузке на четырехглавую мышцу бедра наблюдалось постепенное снижение концентрации оксигенированной фракции гемоглобина, а ее восстановление начиналось сразу же по завершении нагрузки. При нагрузке на двуглавую мышцу плеча восстановление концентрации происходило в процессе нагрузки и почти сразу же после снижения до минимального значения. Скорость восстановления резко увеличилась по завершении нагрузки, что, вероятно, связано с различными типами гемодинамики и характером нагрузки [6].

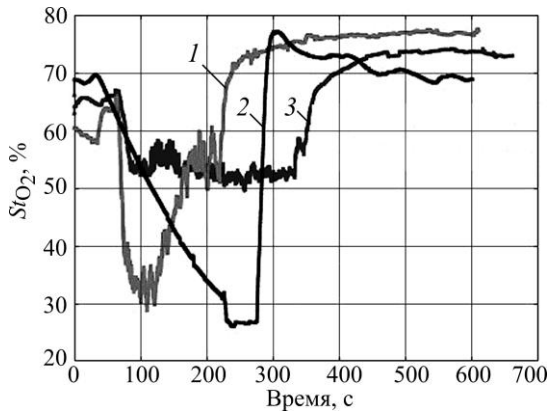


Рис. 2. Динамика изменения функциональной сатурации оксигемоглобина в мышечной ткани при нагрузке на двуглавую мышцу плеча (кривая *1*), на четырехглавую мышцу бедра (кривая *3*) и в тканях предплечья при артериальной сатурации (кривая *2*)

Fig. 2. Dynamics of changes in functional oxyhemoglobin saturation in muscle tissue during muscle loading of the biceps brachii (curve *1*), quadriceps femoris (curve *3*) and in the forearm tissues during arterial saturation (curve *2*)

По результатам экспериментов измерения оксигенации гемоглобина при мышечной нагрузке также проведено сравнение разницы значений концентрации и сатурации оксигемоглобина. Отметим, что при измерении параметров оксигенации в двуглавой мышце плеча эффект гиперкомпенсации проявился в большей степени: разница значений сатурации ΔSt_3 оксигемоглобина в состоянии гиперкомпенсации St_3 и покоя St_1 в два раза превысила аналогичные значения при измерении в четырехглавой мышце бедра и для случая артериальной окклюзии (рис. 2).

В табл. 2 представлены характерные значения параметров оксигенации гемоглобина при нагрузке на мышцы, полученные с помощью разных приборов.

Таблица 2

Характерные значения параметров оксигенации гемоглобина при нагрузке на мышцы

Table 2

Characteristic values of the parameters of hemoglobin oxygenation during muscle loading

Мышца (или ткани) / Тип нагрузки	Прибор / Метод измерения	C_{HbO_2}, мкмоль/л					St_{O_2}, %						Источник
		C_1	C_2	C_3	ΔC_1	ΔC_2	St_1	St_2	St_3	ΔSt_1	ΔSt_2	ΔSt_3	
Ткани предплечья / Артериальная окклюзия	NIRS4 (Medical Computer Systems Ltd., Россия) / Разработанный алгоритм	107	44	143	**63**	**99**	68	26	77	**42**	**51**	**9**	Настоящая работа
Четырехглавая мышца бедра / Приседания в течение 280 с		107	82	135	**25**	**53**	65	51	73	**14**	**22**	**8**	
Двуглавая мышца плеча / Подъем гантели на бицепс в течение 160 с		124	53	195	**71**	**142**	60	30	76	**30**	**46**	**16**	
Четырехглавая мышца бедра / Работа на велотренажере в течение 120 с	TRS-20 (Hamamatsu Photonics K.K., Япония) / NIRS с временным разрешением	60	50	65	**10**	**15**	70	60	80	**42**	**51**	**10**	[16]
Четырехглавая мышца бедра / Работа на велотренажере в течение 360 с	NIRO-200 (Hamamatsu Photonics K.K., Япония) / NIRS с пространственным разрешением	95	90	–	**5**	–	–	–	–	–	–	–	[17]
	TRS-20 (Hamamatsu Photonics K.K., Япония) / NIRS с временным разрешением	95	80	–	**15**	–	–	–	–	–	–	–	
Четырехглавая мышца бедра / Работа на велотренажере в течение 100 с	Moxy (Fortiori Design LLC, США) / NIRS с пространственным разрешением	1969*	1953*	1984*	**16***	**31***	73	37	81	**36**	**44**	**8**	[18]
Двуглавая мышца плеча / Подъем гантели на бицепс в течение 60 с	NIRO-200 oximeter (Hamamatsu Photonics K.K., Япония) / NIRS с пространственным разрешением	–	–	–	–	–	–	–	–	**36**	**54**	**18**	[19]
Икроножная мышца / Серия беговых упражнений	PortaMon (Artinis Medical Systems BV, Нидерланды) / NIRS с пространственным разрешением	–	–	–	**10**	**15**	–	–	–	**15**	**20**	**5**	[20]

* – общая концентрация гемоглобина C_{Hb_t}, мкмоль/л; «–» – нет данных.

Согласно табл. 2 характерные значения параметров изменения концентрации оксигемоглобина и сатурации (выделены жирным шрифтом), полученные с помощью прибора NIRS4, соответствуют значениям, полученным с применением других приборов и методов. Данные результаты подтверждают возможность применения прибора NIRS4 в исследованиях динамики оксигенации мышц и являются основой для разработки методов диагностики и мониторинга состояния мышечных тканей согласно данным о концентрации гемоглобина.

Оксигенация моторной коры головного мозга. С использованием прибора NIRS4 и разработанного алгоритма получены и обработаны данные эксперимента, в ходе которого исследовали динамику изменения оксигенации в моторной коре головного мозга в ответ на постукивание пальцем по столу. Полученные зависимости представлены на рис. 3.

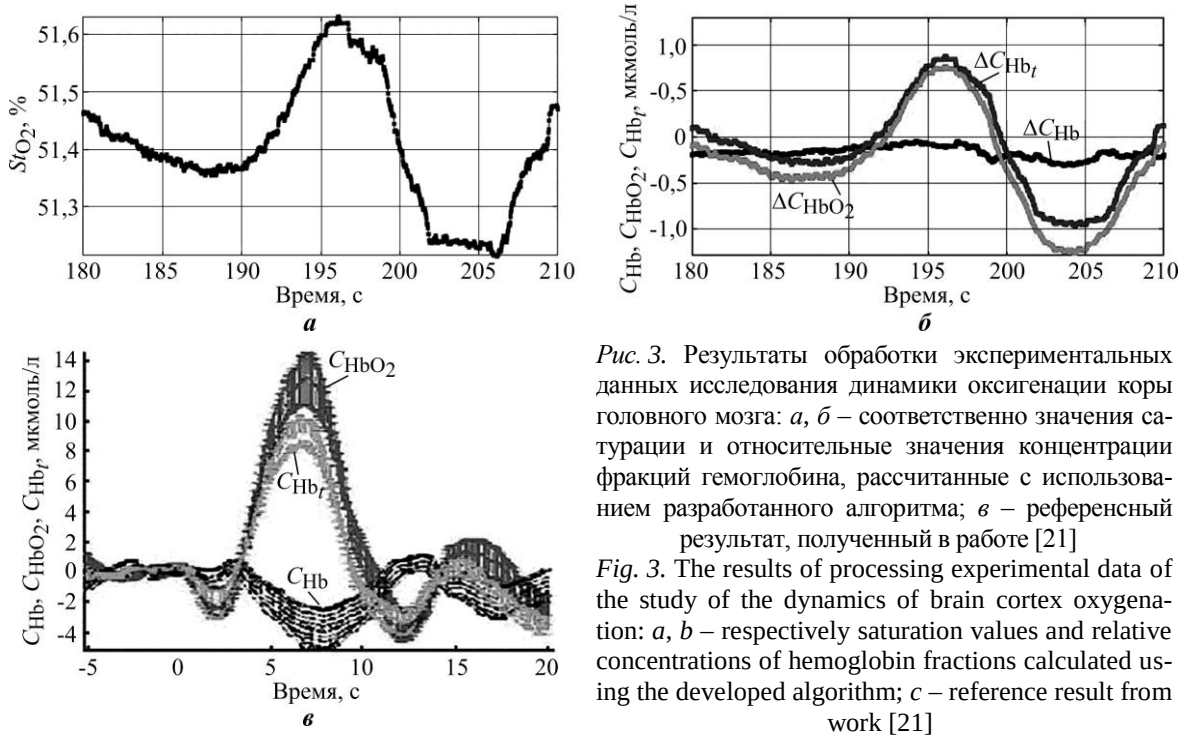


Рис. 3. Результаты обработки экспериментальных данных исследования динамики оксигенации коры головного мозга: *а*, *б* – соответственно значения сатурации и относительные значения концентрации фракций гемоглобина, рассчитанные с использованием разработанного алгоритма; *в* – референсный результат, полученный в работе [21]

Fig. 3. The results of processing experimental data of the study of the dynamics of brain cortex oxygenation: *a*, *b* – respectively saturation values and relative concentrations of hemoglobin fractions calculated using the developed algorithm; *c* – reference result from work [21]

Предварительную обработку исходных данных проводили с помощью медианного фильтра. Для расчета изменений концентрации фракций гемоглобина применяли усредненное значение в качестве базовой линии. Также при проведении вычислений использовали значения дифференциального фактора длины пути *DPF* и модифицированного фактора ослабления $\tilde{G}^{770}, \tilde{G}^{850}$, характерные для головы человека [5]. Полученные данные демонстрируют, что прибор NIRS4 способен регистрировать изменения концентрации гемоглобина в коре головного мозга. При этом значения изменений для каждой фракции гемоглобина соответствуют значениям, приведенным в работе [21] (см. рис. 3).

Можно отметить некоторое расхождение в значениях амплитуды смещения концентрации оксигемоглобина относительно базовой линии по сравнению с референсным результатом. В работах [22–24], в которых исследуется активность моторной коры головного мозга методами спектроскопии в ближней ИК-области, приводятся те же значения смещения концентрации оксигемоглобина относительно базовой линии на десятые доли – единицы мкмоль/л.

Проведено полномасштабное исследование влияния интервальной гипоксической тренировки и технологии электростимуляции мышц на продуктивность человека, кото-

рое включало в себя оценку изменения концентраций окси- и дезоксигемоглобина в префронтальной коре с применением прибора NIRS4 [3]. Всего в исследовании приняли участие 47 индоевропейских мужчин в возрасте от 25 до 50 лет. В результате обнаружено достоверное изменение только в группе испытуемых, выполнявших тренировки с использованием электростимуляции мышц. Это выражалось в повышении концентрации общего гемоглобина и оксигемоглобина, а также в снижении уровня сатурации тканей *St* в левой области префронтальной коры. В то же время отмечено снижение концентрации гемоглобина в правой области префронтальной коры. Результаты измерений представлены на рис. 4.

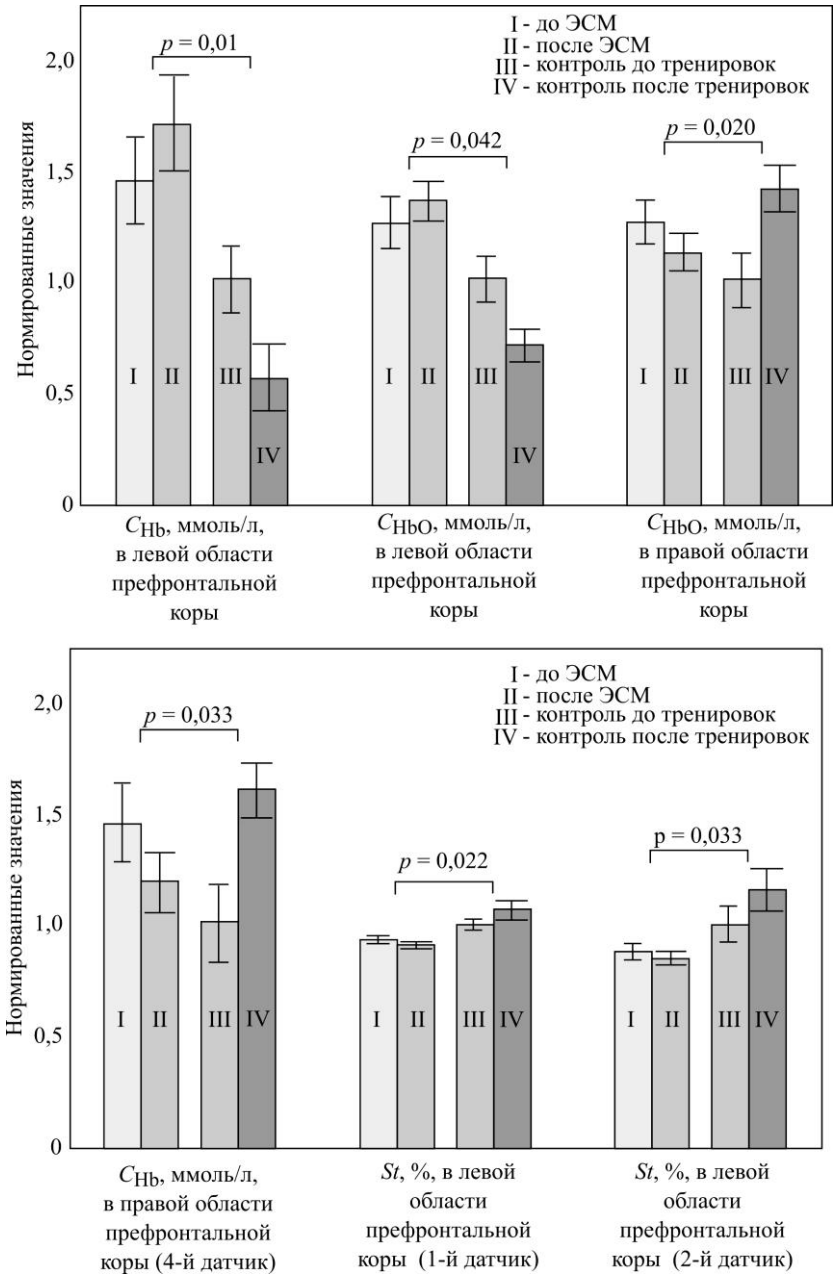


Рис. 4. Параметры оксигенации до и после проведения тренировок с электростимуляцией мышц (ЭСМ) и в контрольной группе [3]
Fig. 4. Parameters of oxygenation before and after exercise with electrical muscle stimulation and in the control group [3]

Заключение. Проведенные эксперименты доказывают возможность применения прибора NIRS4 для анализа динамики оксигенации головного мозга. Сравнение результатов измерения концентрации для каждой фракции гемоглобина, приведенных в работе, с результатами, полученными с помощью других приборов и методов, показывает возможность применения разработанного алгоритма и прибора NIRS4 для измерения концентрации окси- и дезоксигемоглобина.

Результаты исследования могут использоваться для ранней диагностики биохимической активности организма. Это открывает новые возможности для развития методов диагностики и контроля состояния здоровья на основе показателей концентрации гемоглобина в крови.

Литература

1. ***Grassi B., Quaresima V.*** Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: A review from an exercise physiology perspective // J. Biomed. Opt. 2016. Vol. 21. No. 9. Art. No. 091313. https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091313

2. ***Mesquida J., Gruartmoner G., Espinal C.*** Skeletal muscle oxygen saturation (StO_2) measured by near-infrared spectroscopy in the critically ill patients // BioMed Res. Int. 2013. Vol. 2013. Art. ID: 502194. https://doi.org/10.1155/2013/502194

3. Effects of intermittent hypoxia and electrical muscle stimulation on cognitive and physiological metrics / ***E. Reganova, K. Solovyeva, D. Buyanov et al.*** // Bioengineering. 2023. Vol. 10. Iss. 5. Art. No. 536. https://doi.org/10.3390/bioengineering10050536

4. ***Jöbsis F. F.*** Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters // Science. 1977. Vol. 198. No. 4323. P. 1264–1267. https://doi.org/10.1126/science.929199

5. ***Buyanov D. A., Shalaev P. V., Zabodaev S. V., Gerasimenko A. Yu.*** An algorithm for measuring absolute and relative hemoglobin concentrations using near infrared spectroscopy // Biomed. Eng. 2022. Vol. 56. Iss. 3. P. 176–179. https://doi.org/10.1007/s10527-022-10193-4

6. Измерение параметров оксигенации гемоглобина при артериальной окклюзии и физических нагрузках / ***Д. А. Буянов, П. В. Шалаев, С. В. Забодаев и др.*** // Медицинская техника. 2023. № 3 (339). С. 39–41. EDN: ERHPKS.

7. ***Barstow T. J.*** Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research // Journal of Applied Physiology. 2019. Vol. 126. Iss. 5. P. 1360–1376. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00166.2018

8. ***Ferrari M., Binzoni T., Quaresima V.*** Oxidative metabolism in muscle // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. 1997. Vol. 352. Iss. 1354. P. 677–683. https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0049

9. ***Colier W. N. J. M.*** Near infrared spectroscopy: toy or tool? An investigation on the clinical applicability of near infrared spectroscopy. Nijmegen: Katholieke Universiteit Nijmegen, 1995. 105 p.

10. ***Zhang C., McCully K. K.*** The case for measuring long bone hemodynamics with near-infrared spectroscopy // Front. Physiol. 2020. Vol. 11. Art. ID: 615977. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.615977

11. Cerebral and muscle oxygen saturation measurement by frequency-domain near-infra-red spectrometer / ***R. A. De Blasi, S. Fantini, M. A. Franceschini et al.*** // Med. Biol. Eng. Comput. 1995. Vol. 33. Iss. 2. P. 228–230. https://doi.org/10.1007/BF02523048

12. Quantitative measurement of muscle oxygen saturation without influence from skin and fat using continuous-wave near infrared spectroscopy / ***Y. Yang, O. O. Soyemi, P. J. Scott et al.*** // Opt. Express. 2007. Vol. 15. Iss. 21. P. 13715–13730. https://doi.org/10.1364/OE.15.013715

13. Microvascular dysfunction and skeletal muscle oxygenation assessed by phase-modulation near-infrared spectroscopy in patients with septic shock / ***R. A. De Blasi, S. Palmisani, D. Alampi et al.*** // Intensive Care Med. 2005. Vol. 31. Iss. 12. P. 1661–1668. https://doi.org/10.1007/s00134-005-2822-y

14. Quantification of ischemic muscle deoxygenation by near infrared time-resolved spectroscopy / ***T. Hamaoka, T. Katsumura, N. Murase et al.*** // J. Biomed. Opt. 2000. Vol. 5. Iss. 1. P. 102–105. https://doi.org/10.1117/1.429975

15. NIRS device comparison, part 1 / NIRSport Science // YouTube [Электронный ресурс]. URL: https://youtu.be/hQGqsYhEdZk (дата обращения: 31.01.2024).

16. Cerebral and muscle tissue oxygenation during incremental cycling in male adolescents measured by time-resolved near-infrared spectroscopy / ***G. Ganesan, S.-Y. Leu, A. Cerussi et al.*** // Pediatr. Exerc. Sci. 2016. Vol. 28. Iss. 2. P. 275–285. https://doi.org/10.1123/pes.2015-0037

17. Active muscle oxygenation dynamics measured during high-intensity exercise by using two near-infrared spectroscopy methods / ***T. Saitoh, A. Ooue, N. Kondo et al.*** // Oxygen Transport to Tissue XXXI / eds E. Takahashi, D. F. Bruley. Boston, MA: Springer, 2010. P. 225–230. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1241-1_32

18. ***Matthews E.*** NIRS muscle oxygen saturation – PeriPedal // YouTube [Электронный ресурс]. URL: https://youtu.be/xKl9tyQ6jfQ (дата обращения: 31.01.2023).

19. ***Muthalib M., Millet G. Y., Quaresima V., Nosaka K.*** Reliability of near-infrared spectroscopy for measuring biceps brachii oxygenation during sustained and repeated isometric contractions // J. Biomed. Opt. 2010. Vol. 15. Iss. 1. Art. No. 017008. https://doi.org/10.1117/1.3309746

20. ***Jones B., Hesford C. M., Cooper C. E.*** The use of portable NIRS to measure muscle oxygenation and haemodynamics during a repeated sprint running test // Oxygen Transport to Tissue XXXV / eds S. Van Huffel et al. New York, NY: Springer, 2013. P. 185–191. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7411-1_26

21. A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans / ***T. J. Huppert, R. D. Hoge, S. G. Diamond et al.*** // NeuroImage. 2006. Vol. 29. Iss. 2. P. 368–382. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.08.065

22. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology / ***F. Scholkmann, S. Kleiser, A. J. Mets et al.*** // NeuroImage. 2014. Vol. 85 (1). P. 6–27. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.004

23. ***Colier W. N. J. M., Quaresima V., Oeseburg B., Ferrari M.*** Human motor-cortex oxygenation changes induced by cyclic coupled movements of hand and foot // Exp. Brain Res. 1999. Vol. 129. Iss. 3. P. 457–461. https://doi.org/10.1007/s002210050913

24. Quantification of the cortical contribution to the NIRS signal over the motor cortex using concurrent NIRS-fMRI measurements / ***L. Gagnon, M. A. Yücel, M. Dehaes et al.*** // NeuroImage. 2012. Vol. 59. Iss. 4. P. 3933–3940. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.10.054

Статья поступила в редакцию 11.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 24.07.2023 г.;
принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторах

Буянов Дмитрий Анатольевич – аспирант Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), технический директор ООО «Медицинские Компьютерные Системы» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пр-д 4922, 4, стр. 2), buyancik@gmail.com

Шалаев Павел Владимирович – руководитель отдела разработки ООО «Айвок» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пр-д 4922, 4, стр. 5), shalaev.pv@gmail.com

Монахова Полина Андреевна – аспирант Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Айвок» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пр-д 4922, 4, стр. 5), mpolina09@mail.ru

Герасименко Александр Юрьевич – доктор технических наук, доцент Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), доцент Института бионических технологий и инжиниринга Первого Московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова Минздрава России (Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2), gerasimenko@bms.zone

References

1. Grassi B., Quaresima V. Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: A review from an exercise physiology perspective. *J. Biomed. Opt.*, 2016, vol. 21, no. 9, art. no. 091313. https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091313

2. Mesquida J., Gruartmoner G., Espinal C. Skeletal muscle oxygen saturation (StO_2) measured by near-infrared spectroscopy in the critically ill patients. *BioMed Res. Int.*, 2013, vol. 2013, art. ID: 502194. https://doi.org/10.1155/2013/502194

3. Reganova E., Solovyeva K., Buyanov D., Gerasimenko A. Yu., Repin D. Effects of intermittent hypoxia and electrical muscle stimulation on cognitive and physiological metrics. *Bioengineering*, 2023, vol. 10, iss. 5, art. no. 536. https://doi.org/10.3390/bioengineering10050536

4. Jöbsis F. F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 1977, vol. 198, no. 4323, pp. 1264–1267. https://doi.org/10.1126/science.929199

5. Buyanov D. A., Shalaev P. V., Zabodaev S. V., Gerasimenko A. Yu. An algorithm for measuring absolute and relative hemoglobin concentrations using near infrared spectroscopy. *Biomed. Eng.*, 2022, vol. 56, iss. 3, pp. 176–179. https://doi.org/10.1007/s10527-022-10193-4

6. Buyanov D. A., Shalaev P. V., Zabodaev S. V., Monakhova P. A., Stavtsev D. D., Konovalov A. N., Gerasimenko A. Yu. Measurement of hemoglobin oxygenation parameters during arterial occlusion and physical exertion. *Meditsinskaya tekhnika*, 2023, no. 3 (339), pp. 39–41. (In Russian). EDN: ERHPKS.

7. Barstow T. J. Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research. *Journal of Applied Physiology*, 2019, vol. 126, iss. 5, pp. 1360–1376. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00166.2018

8. Ferrari M., Binzoni T., Quaresima V. Oxidative metabolism in muscle. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1997, vol. 352, iss. 1354, pp. 677–683. https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0049

9. Colier W. N. J. M. *Near infrared spectroscopy: toy or tool? An investigation on the clinical applicability of near infrared spectroscopy.* Nijmegen, Katholieke Universiteit Nijmegen, 1995. 105 p.

10. Zhang C., McCully K. K. The case for measuring long bone hemodynamics with near-infrared spectroscopy. *Front. Physiol.*, 2020, vol. 11, art. ID: 615977. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.615977

11. De Blasi R. A., Fantini S., Franceschini M. A., Ferrari M., Grattom E. Cerebral and muscle oxygen saturation measurement by frequency-domain near-infra-red spectrometer. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 1995, vol. 33, iss. 2, pp. 228–230. https://doi.org/10.1007/BF02523048

12. Yang Y., Soyemi O. O., Scott P. J., Landry M. R., Lee S. M. C., Stroud L., Soller B. R. Quantitative measurement of muscle oxygen saturation without influence from skin and fat using continuous-wave near infrared spectroscopy. *Opt. Express*, 2007, vol. 15, iss. 21, pp. 13715–13730. https://doi.org/10.1364/OE.15.013715

13. De Blasi R. A., Palmisani S., Alampi D., Mercieri M., Romano R., Collini S., Pinto G. Microvascular dysfunction and skeletal muscle oxygenation assessed by phase-modulation near-infrared spectroscopy in patients with septic shock. *Intensive Care Med.*, 2005, vol. 31, iss. 12, pp. 1661–1668. https://doi.org/10.1007/s00134-005-2822-y

14. Hamaoka T., Katsumura T., Murase N., Nishio S., Osada T., Sako T., Higuchi H., Kurosawa Y. et al. Quantification of ischemic muscle deoxygenation by near infrared time-resolved spectroscopy. *J. Biomed. Opt.*, 2000, vol. 5, iss. 1, pp. 102–105. https://doi.org/10.1117/1.429975

15. NIRS device comparison, part 1, by NIRSport Science. *YouTube*. Available at: https://youtu.be/hQGqsYhEdZk (accessed: 31.01.2024).

16. Ganesan G., Leu S.-Y., Cerussi A., Tromberg B., Cooper D. M., Galassetti P. Cerebral and muscle tissue oxygenation during incremental cycling in male adolescents measured by time-resolved near-infrared spectroscopy. *Pediatr. Exerc. Sci.*, 2016, vol. 28, iss. 2, pp. 275–285. https://doi.org/10.1123/pes.2015-0037

17. Saitoh T., Ooue A., Kondo N., Niizeki K., Koga S. Active muscle oxygenation dynamics measured during high-intensity exercise by using two near-infrared spectroscopy methods. *Oxygen Transport to Tissue XXXI*, eds E. Takahashi, D. Bruley. Boston, MA, Springer, 2010, pp. 225–230. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1241-1_32

18. Matthews E. NIRS muscle oxygen saturation – PeriPedal. *YouTube*. Available at: https://youtu.be/xKl9tyQ6jfQ (accessed: 31.01.2023).

19. Muthalib M., Millet G. Y., Quaresima V., Nosaka K. Reliability of near-infrared spectroscopy for measuring biceps brachii oxygenation during sustained and repeated isometric contractions. *J. Biomed. Opt.*, 2010, vol. 15, iss. 1, art. no. 017008. https://doi.org/10.1117/1.3309746

20. Jones B., Hesford C. M., Cooper C. E. The use of portable NIRS to measure muscle oxygenation and haemodynamics during a repeated sprint running test. *Oxygen Transport to Tissue XXXV*, eds S. Van Huffel et al. New York, NY, Springer, 2013, pp. 185–191. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7411-1_26

21. Huppert T. J., Hoge R. D., Diamond S. G., Franceschini M. A., Boas D. A. A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans. *NeuroImage*, 2006, vol. 29, iss. 2, pp. 368–382. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.08.065

22. Scholkmann F., Kleiser S., Metz A. J., Zimmermann R., Pavia J. M., Wolf U., Wolf M. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *NeuroImage*, 2014, vol. 85 (1), pp. 6–27. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.004

23. Colier W. N. J. M., Quaresima V., Oeseburg B., Ferrari M. Human motor-cortex oxygenation changes induced by cyclic coupled movements of hand and foot. *Exp. Brain Res.*, 1999, vol. 129, iss. 3, pp. 457–461. https://doi.org/10.1007/s002210050913

24. Gagnon L., Yücel M. A., Dehaes M., Cooper R. J., Perdue K. L., Selb J., Huppert T. J., Hoge R. D., Boas D. A. Quantification of the cortical contribution to the NIRS signal over the motor cortex using concurrent NIRS-fMRI measurements. *NeuroImage*, 2012, vol. 59, iss. 4, pp. 3933–3940. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.10.054

The article was submitted 11.07.2023; approved after reviewing 24.07.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the authors

Dmitriy A. Buyanov – PhD student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Chief Technical Officer, "Medical Computer Systems" LLC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4, bld. 2), buyancik@gmail.com

Pavel V. Shalaev – Head of the Development Department, "Aivok" LLC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4, bld. 5), shalaev.pv@gmail.com

Polina A. Monakhova – PhD student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Aivok" LLC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4, bld. 5), mpolina09@mail.ru

Alexander Yu. Gerasimenko – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Assoc. Prof. of the Institute of Bionic Technologies and Engineering, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of Russian Federation (Russia, 119991, Moscow, Trubetskaya st., 8, bld. 2), gerasimenko_a_yu@staff.sechenov.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

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 007.51, 303.732
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-236-248
EDN: IQKKTG

Синтез иерархической многоуровневой модели параметров для оценки эффективности системы защиты информации в условиях неопределенных данных

А. В. Лубенцов

Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

lubensov@mail.ru

Аннотация. Современные системы защиты информации являются сложными многоступенчатыми структурами. При их функционировании в режиме сложной адаптивной системы большинство базовых предположений, таких как устойчивые базовые состояния, стандартная размерность параметров, предсказуемость ответных действий, стабильность функционирования, не соответствуют текущим процессам. Для определения параметров функционирования таких сложных систем необходимо разрабатывать другие модели. В создаваемые методы, приемы и методики следует включать информацию о динамической природе, данные телеметрии сложных адаптивных систем защиты информации. В работе представлены методы и модели, на базе которых сформирована оригинальная методика оценки эффективности сложных адаптивных систем, одной из которых является комплексная система информационной безопасности. Предложен системный анализ исследований по выполнению задачи оценки эффективности сложной системы в общем. Рассмотрены практические примеры оценки эффективности нескольких вычислительных структур (контроллеров) как управляющих элементов комплексных адаптивных систем информационной безопасности. Анализ чувствительности, эффективности и веса критериев позволяет поддерживать эффективность работы каждой подсистемы или элемента, а также системы информационной безопасности в целом и определять основные факторы, влияющие на результаты ее оценки.

Ключевые слова: сложная адаптивная система информационной безопасности, оценка эффективности, контроллер

© А. В. Лубенцов, 2024

Для цитирования: Лубенцов А. В. Синтез иерархической многоуровневой модели параметров для оценки эффективности системы защиты информации в условиях неопределенных данных // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 236–248. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-236-248. – EDN: IQKKTG.

Original article

Synthesis of a hierarchical multilevel parameter model for evaluating the effectiveness of an information security system under conditions of uncertain data

A. V. Lubentsov

Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russia

lubensov@mail.ru

Abstract. Contemporary information security systems are complex multi-stage structures. When these systems operate in the mode of a complex adaptive system, most of basic assumptions, such as stable basic states, standard dimension of parameters, response actions predictability, stable functioning, do not correspond to current processes. In order to determine these systems' operating parameters, it is necessary to create other models, including in methods, techniques and procedures being created the information about dynamic nature and telemetry data of complex adaptive information security systems. In this work, methods and models are presented, on the base of which an original methodology has been formed for complex adaptive system effectiveness evaluation, including but not limited to complex information security system. A systemic analysis of research on the task of evaluating the effectiveness of a complex system in general is proposed. Practical examples of evaluating the effectiveness of several computing structures (controllers) as control elements of complex adaptive information security systems are considered. The analysis of test sensitivity, test efficiency and criteria weight makes it possible to maintain the performance effectiveness of each subsystem or element, as well as of entire information security system, and to determine key factors affecting its evaluation results.

Keywords: complex adaptive information security system, effectiveness evaluation, controller

For citation: Lubentsov A. V. Synthesis of a hierarchical multilevel parameter model for evaluating the effectiveness of an information security system under conditions of uncertain data. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 236–248. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-236-248. – EDN: IQKKTG.

Введение. Численная оценка эффективности сложных комплексных систем имеет особое значение для систем информационной безопасности. В перспективе эффективность работы на всех уровнях будут оценивать лица, принимающие решения, управляющие программы и эксплуатационные команды. Данные оценки – это основа для постоянного совершенствования и принятия обоснованных решений относительно дальнейшей эксплуатации сложных комплексных систем.

Для того чтобы быть качественной, программа оценки эффективности должна соответствовать динамике системы, к которой она применяется. Нередко приходится оперировать факторами с неопределенными параметрами или характеристиками. Поэтому новые модели и методики, разрабатываемые для оценки эффективности сложных систем, позволят исключить или уменьшить субъективные оценки при принятии управленческих решений.

В настоящей работе предлагается новый подход к использованию базовых правил (БП) с неопределенными параметрами. Неопределенность веса и достоверности может быть выражена в интервальной форме. Для достижения оптимизации параметров строится модель нелинейной оптимизации.

Обзор существующих моделей оценки сложных систем. Модели построения оценок эффективности сложных систем основаны на экспертных данных с большой долей субъективизма, что недопустимо при анализе сложных систем. В работе [1] обсуждены методы построения матрицы критериев для определения эффективности программных модулей. Однако в исследовании не объяснено, чем подход авторов принципиально отличается от метода анализа иерархий (МАИ) Т. Сати. Вместе с тем для отбора весов и критериев необходимо привлекать экспертов, что уже в базе закладывает субъективное влияние. В работе [2] предложено оптимизировать математическую модель вычислений МАИ для повышения скорости принятия решений. Однако представлен метод упрощения методики, а не повышения достоверности, уменьшения субъективности и перехода к численной оценке. В работах [3, 4] описан модифицированный каскадный МАИ, позволяющий значительно снизить влияние лица, принимающего решение.

Оригинальное математическое решение ускоренной оценки эффективности управляющих АСУ на базе третьей формулы Фишберна рассмотрено в [5]. Для этого применен заранее постулированный список параметров эффективности, который следует готовить для каждого класса задач АСУ. Вместе с тем в работах [3, 4] предложены модели автоматизации и распараллеливания МАИ, что значительно ускоряет и упрощает оценку.

В работе [6] оценена эффективность и результативность экспертных обучающих систем при определении результативности как степени достижения результата, эффективности как отношения результата к затратам. Это дает возможность оценить параметры сложной системы, но в относительных величинах. Модель не позволяет получить достоверных численных результатов.

Для анализа структуры сложных систем, как правило, используется общая модель сети Петри, позволяющая оценить структуру и взаимодействие элементов. Однако, если система достаточно сложная, масштаб модели сети Петри может быть большим, что затрудняет получение результата. Использование объединенной целевой функции помогает справиться с неопределенностью систем. В этом случае необходимо знать функцию плотности вероятности переменной, когда функция применяется для анализа системы, а функцию плотности вероятности переменной в инженерной практике сложно точно рассчитать. В работе [7] представлен метод оценки рисков безопасности строительства на основе бинарной диаграммы принятия решений. Дерево неисправностей преобразуется в структуру бинарной диаграммы принятия решений, и получаются ключевые факторы, влияющие на безопасность, что обеспечивает основу для формулирования мер контроля рисков. Когда сложность системы высока или масштаб системы велик, размеры построенной модели диаграммы принятия решений и вычислительная сложность значительно возрастают.

Подход построения БП предложен и применен к оценке характеристик сложной технической системы в работе [8], что позволяет эффективно устранить проблему принятия решений с несколькими атрибутами. Исходя из этого в работе [9] разработан расширенный алгоритм БП, который позволяет методу БП справиться с интервальной неопределенностью, такой как интервальные данные, и эквивалентно преобразовать интервальные данные в интервальные степени уверенности [10].

В настоящее время метод БП широко используется в зарубежных исследованиях в задачах принятия решений и оценки. В качестве ключевого параметра метода БП вес оценки указывает на относительную важность критерия, отражающего степень предпочтения лицами, принимающими решения. Лица, принимающие решения, имеют разные предпочтения в отношении критериев, что может привести к разным оценкам [11–14]. Достоверность критериев свидетельствует о способности источников предоставлять эффективную информацию. Разные виды шума и помех в критериях сложно устранить, что приводит к неопределенности в достоверности критериев [14]. По сравнению с точным числовым выражением интервальное выражение достоверности и веса больше подходит для инженерной практики.

Формулировка проблемы. Системная структура и принцип работы комплексной системы безопасности многомерны и сложно структурированы. Использование метода БП для оценки ее эффективности дает возможность работать с неопределенной информацией, включая субъективные и объективные неопределенности. Это позволяет уменьшить влияние неопределенных факторов на результат оценки. Учитывая эффективность элементов внутренней структуры сложных систем, можно генерировать предложения по разработке стратегии технического обслуживания и модернизации. Следовательно, необходимо решить задачи неопределенности параметров и чувствительности результатов оценки.

Из-за субъективности, недостатка времени и компетенций лица, принимающие решения, часто не могут получить и интерпретировать точную информацию о некоторых атрибутах. В инженерной практике объективно существуют всевозможные неопределенные факторы. Ввиду нерепрезентативности выборки, точности и стабильности испытательного оборудования, а также объективного существования ошибок измерения форму точечных значений параметров нельзя определить методом статистического анализа, который не всегда полностью отражает такие сложные свойства, как изменчивость и неопределенность. Вследствие неопределенности в исходных данных и отсутствия статистических данных метод точной оценки часто затрудняет отражение характеристик оцениваемого параметра.

В инженерной практике входная информация и соответствующая выходная информация сложных систем в основном используются для создания модели оценки, когда внутренний механизм функционирования и состояние элементов системы игнорируются. На эффективность системы влияет подсистема или конкретное оборудование. Необходимо определить основные подсистемы, которые оказывают наибольшее влияние на результат оценки. На основе количественного анализа отсортировывается эффективность подсистем. Затем лица, принимающие решения, предпринимают соответствующие меры для повышения эффективности самых важных подсистем.

Модель нелинейной оптимизации базовых правил. В работе [10] показано, что если степени достоверности исходной входной информации содержат степени достоверности интервала, то метод вычисления значения интервала нельзя просто ввести в уравнения. Для того чтобы правильно агрегировать степень достоверности с несколькими интервалами, следует установить модель нелинейности для оптимизации степени

достоверности всего объекта оценки и получения степени достоверности с соответствующими оценочными баллами.

Определим, что l_i и p_i – это вес и оценка достоверности 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. После получения $b_{n,1}(r_1)$ и $b_{n,2}(r_2)$ промежуточные индексы необходимо объединить для определения результата оценки объекта W. Результат оценки промежуточных индексов представлен в виде степени достоверности, далее следует рассчитать вес и достоверность.

Примем, что максимальное значение общего веса равно 1, а минимальное значение – это максимальное значение каждого критерия. Предположим, что есть две части независимых критериев k_1 и k_2, H_1 и H_2 – оценочные баллы. Критерии k_1 и k_2 соответствуют следующему описанию:

$$k_i = [(H_n, b_{n,i}), \rightarrow n = 1,2, i = 1,2],$$

где $b_{n,i}$ – степень уверенности n-й оценки $H_{n\,i}$-го критерия; p_1 и p_2 – достоверности критериев; l_1 и l_2 – их веса. Обозначим гибридный вес l', представленный как

$$l'_i = l_i / (1 + l_i - p_i).$$

Основные значения промежуточных индексов или вероятностей могут быть получены в следующем виде:

$$r_{n,i} = l'_n b_{n,i},$$
$$r_{H,i} = 1 - l'_i \sum_{n=1}^{N} b_{n,i},$$
$$\bar{r}_{H,i} = 1 - l`_i,$$
$$r'_{H,i} = l'_i \left(1 - \sum_{n=1}^{N} b_{n,i}\right),$$

где $\bar{r}_{H,i}$ – основные значения вероятностей, генерируемые относительной важностью критериев; $r'_{H,i}$ – основные значения вероятностей, вызванные неполнотой оценки; $r_{H,i}$ – результирующие значения вероятностей после агрегирования; $\bar{r}_{H,i} + r'_{H,i} = r_{H,i}$.

Предлагается следующая модель оптимизации:

$$\max/\min b_n = \frac{r_i}{1 - \bar{r}_H},$$
$$r_n = m\left[\prod_{i=1}^{E}(r_{n,i} + \bar{r}_{H,i} + r'_{H,i}) - \prod_{i=1}^{E}(\bar{r}_{H,i} + r'_{H,i})\right], n = 1,2,...,N,$$
$$r'_H = m\left[\prod_{i=1}^{E}(\bar{r}_{H,i} + r'_{H,i}) - \prod_{i=1}^{E}(\bar{r}_{H,i})\right],$$
$$\bar{r}_H = m\left[\prod_{i=1}^{E}(\bar{r}_{H,i})\right],$$
$$m = \left[\sum_{n1}^{N}\prod_{i=1}^{E}(r_{n,i} + \bar{r}_{H,i} + r'_{H,i}) - (N-1)\prod_{i=1}^{E}(\bar{r}_{H,i} + r'_{H,i})\right],$$

$$r_{n,i} = r_i(H_n) = l_i' b_{n,i},$$
$$\overline{r}_{H,i} = \overline{r}_i(H) = 1 - l_i', \quad r'_{H,i} = r_i'(H) = l_i' b_{H,i},$$
$$\overline{l}_i = l_i/(1 + l_i - p_i), \quad l_i^- \le l_i \le l_i^+,$$
$$p_i^- \le p_i \le p_i^+.$$

С помощью программы Matlab можно получить оптимальные значения интервала в соответствии с ограничениями. На основе установленной модели нелинейной оптимизации результаты оптимизации – это диапазон степеней доверия для каждой оценки.

Этапы реализации метода базовых правил с неопределенными параметрами. Согласно приведенному анализу алгоритм реализации метода БП, учитывающий неопределенность веса и достоверность критериев, заключается в следующем.

Шаг 1. На основе анализа ошибок и относительной важности разных критериев с помощью данных тестирования и экспертных знаний определяются диапазоны значений достоверности и веса критериев.

Шаг 2. Входная информация преобразуется в степени достоверности и вычисляются интервальные значения основных вероятностных параметров.

Шаг 3. В соответствии с процессом обоснования метода БП все полученные оценки объединяются.

Шаг 4. Для оптимизации объединенных результатов создается модель нелинейной оптимизации и получаются степени достоверности для каждого оценочного балла.

Процедура предлагаемого способа моделирования с неопределенными параметрами показана на рис. 1. Таким образом, если исходные показатели достоверности, веса и степени уверенности являются точечными значениями, то приведенное рассуждение сводится к общему подходу и модель нелинейной оптимизации больше не нужна.

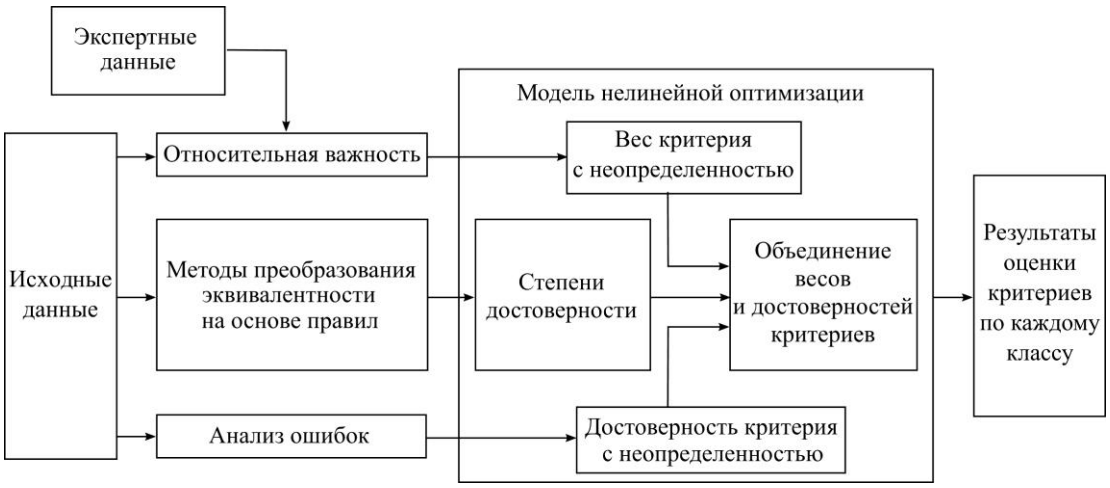


Рис. 1. Блок-схема моделирования с неопределенными параметрами
Fig. 1. Block diagram of simulation with undefined parameters

Анализ достоверности и чувствительности веса критериев. Численный анализ отклика широко используется для оценки влияния параметров модели на результат оценки. При реализации данной модели количественный анализ влияния достоверности и весомости критериев оказывает большое влияние на результат оценки.

Рассмотрим процесс анализа отклика на примере комбинации двух критериев, где на выходе есть два оценочных параметра, с применением рекурсивного алгоритма:

$$r_{n,(2)} = M_{(2)}(r_{n,1}r_{n,2} + r_{n,1}r_{H,2} + r_{H,1}r_{n,2}),$$

$$\overline{r}_{H,(2)} = M_{(2)}(\overline{r}_{H,1)}\overline{r}_{H,2}),$$

$$r'_{H,(2)} = M_{(2)}(r'_{H,1}\overline{r}_{H,2} + \overline{r}_{H,1}r'_{H,2} + r'_{H,1}r'_{H,2}),$$

$$r_{H,(2)} = \overline{r}_{H,(2)} + r'_{H,(2)},$$

$$M_{(2)} = \left(1 - \sum_{t=1}^{2}\sum_{\substack{l=1 \\ l\neq t}}^{2} r_{t,i}r_{l,j}\right)^{-1} = (1 - r_{1,1}r_{2,1} - r_{2,1}r_{1,2})^{-1}.$$

В результате объединения критериев имеем

$$\begin{bmatrix} b1 \\ b2 \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\overline{r}_{H,(2)}}\begin{bmatrix} r_{1,(2)} \\ r_{2,(2)} \end{bmatrix}.$$

На основе данных рассуждений разработан анализ чувствительности параметров к результату оценки.

Достоверность критериев тесно связана с возможностью получения данных с минимальными искажениями. Отдельно необходимо проанализировать отклонения достоверности. При сравнении среднего коэффициента отклонения $F(p)$ каждого критерия получаем чувствительность (анализ отклонений) разных критериев к степени уверенности на выходе. Если $F(p_i) > F(p_j)$, то надежность критерия k_i более чувствительна к результатам, чем надежность критерия k_j. Это означает, что изменение k_i оказывает большее влияние на результат. Если информация, содержащаяся в доказательстве k_i, недостаточно точна, отклонение результата будет больше, чем у других доказательств. Следовательно, в инженерной практике приоритет следует отдавать принятию мер по повышению надежности или точности измерения фактических данных k_i.

Используя описанный метод анализа чувствительности достоверности, можно получить влияние веса на результат. Сравнивая средний коэффициент чувствительности $F(l_i)$ каждого критерия, можно получить чувствительность различных критериев к степени уверенности b на выходе. Если $F(l_i) > F(l_j)$, то вес критерия l_i более чувствителен к результату, чем вес критерия l_j. Это означает, что изменение l_i оказывает большее влияние на результат. Поскольку вес в основном зависит от экспертных знаний, к их точности предъявляются более высокие требования.

Проведем анализ чувствительности, чтобы определить, какой параметр оказывает большее влияние на результат. Влияние веса и достоверности на гибридный вес рассчитаем методом частных производных:

$$\frac{\partial l'}{\partial l_i} = \frac{1-p_i}{(1+l_i-p_i)^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial l'}{\partial p_i} = \frac{l_i}{(1+l_i-p_i)^2}. \quad (2)$$

Определить, какой параметр оказывает большее влияние на результат, можно из уравнений (1) и (2), сравнив $(1–p_i)$ и l_i. Если вес и достоверность одинаковые, то вес оказывает большее влияние на результат. Поэтому лицам, принимающим решения, следует уделять больше внимания относительной важности критериев или точности экспертных знаний. В противном случае точности определения критериев необходимо уделять приоритетное внимание.

Таким образом, отклонения в надежности или весомости критериев влияют на результат оценки. Для того чтобы предотвратить подобные случаи в инженерной практике, интервальная достоверность и вес используются для выражения неопределенности критериев, которые оказывают поддержку лицам, принимающим решения, в условиях неопределенности.

В процессе оценки и оптимизации могут быть решены такие проблемы неопределенности, как ненадежные данные и неточность экспертных знаний, и получен диапазон результатов оценки.

Результаты практического моделирования. Для практического моделирования выбраны промышленные контроллеры компании «Сегнетикс» (г. Санкт-Петербург, Россия), широко применяемые в различных сферах, в том числе в системах информационной безопасности. Получены характеристики быстродействия четырех контроллеров (таблица). Для эффективной визуализации результатов выбраны контроллеры разных поколений. Общая схема модели показана на рис. 2.

Характеристики быстродействия контроллеров компании «Сегнетикс», мс
Performance characteristics of the controllers of the company Segnetix, ms

Тестовые задачи	Контроллер			
	SMH2010, 1000 FBD	SMH2G, 1000 FBD	SMH2G(i), 1000 FBD	TRIM5, SMH4, Matrix, 1000 FBD
Сложение и вычитание (тип INTEGER)	30	28	0,5	0,4
Умножение (тип INTEGER)	33	30	0,4	0,4
Деление (тип INTEGER)	50	48	0,7	0,4
Сложение и вычитание (тип LONG)	32	30	0,5	0,4
Умножение (тип LONG)	37	35	0,4	0,3
Деление (тип LONG)	85	83	0,9	0,4
Сложение и вычитание (тип REAL)	36	35	0,9	0,4
Умножение (тип REAL)	36	34	1,2	0,4
Деление (тип REAL)	35	35	1,6	0,4
Тестовая программа из 1000 блоков AND, OR, XOR и NOT в равных долях	20	20	0,4	0,3
Тестовая программа из 1000 блоков MIN/MAX(int)	33	35	0,6	0,2
Тестовая программа из 1000 блоков MIN/MAX(long)	37	39	0,6	0,2
Тестовая программа из 1000 блоков MIN/MAX(real)	40	53	1,3	0,5

Первым шагом оценки является анализ данных тестирования. Оценочная информация может быть преобразована в степени достоверности. На основе разброса рассчитывают достоверность каждого индекса. Для расчета веса каждого индекса используют метод коэффициента вариации. Чтобы уменьшить ошибку, вызванную случайными

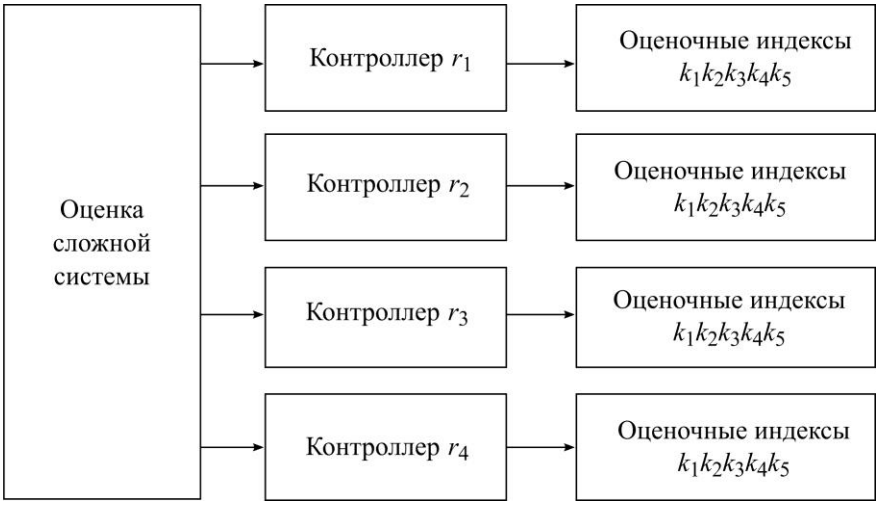
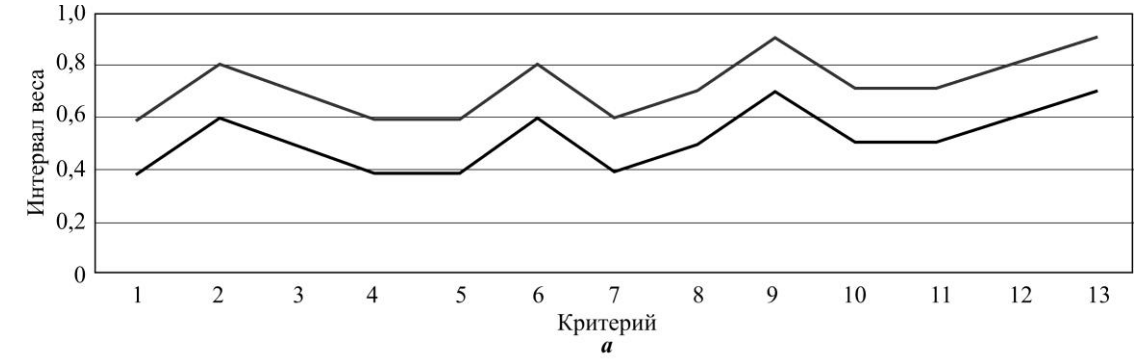
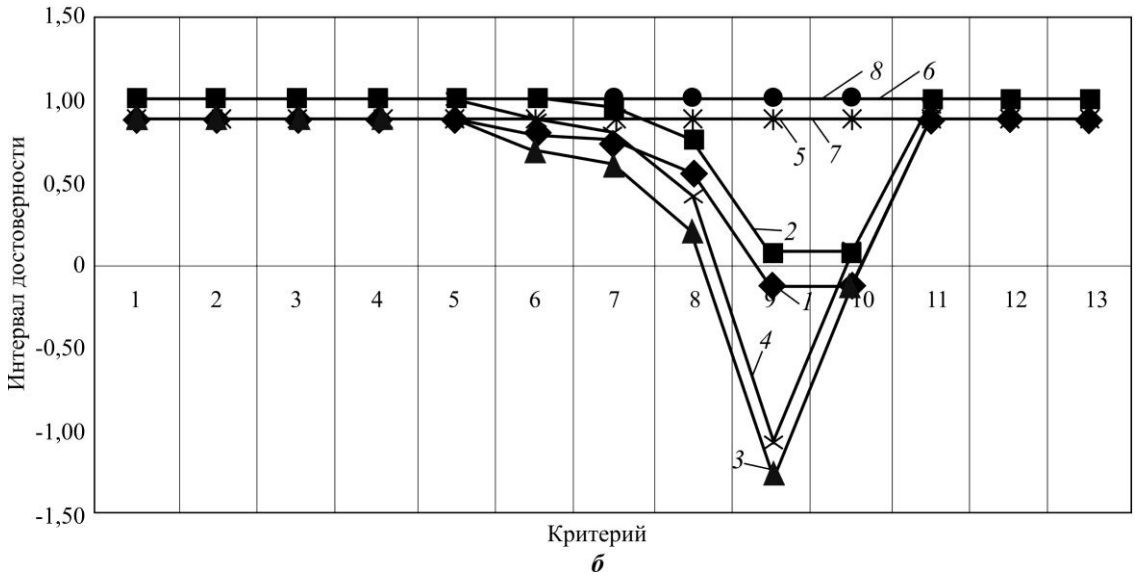


Рис. 2. Общая схема модели расчета эффективности сложной системы
Fig. 2. General scheme of the model for calculating the efficiency of a complex system



а



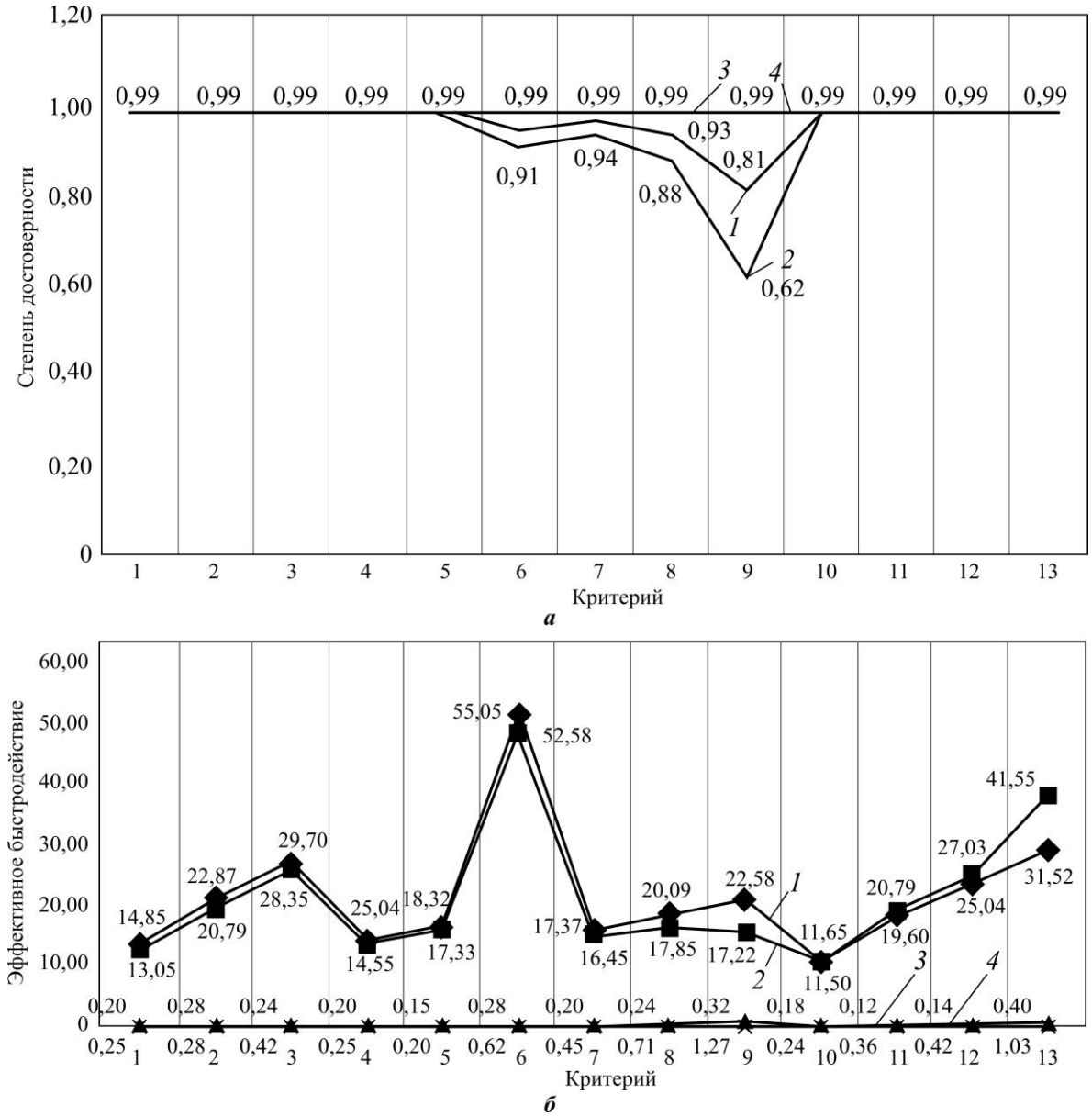
б

Рис. 3. Интервалы веса (*а*) и достоверности (*б*) для критериев контроллеров: *1* – SMH2010; *2* – SMH2010; *3* – SMH2G; *4* – SMH2G; *5* – SMH2G(I); *6* – SMH2G(II); *7* – TRIM5, SMH4, Matrix; *8* – TRIM5, SMH4, Matrix

Fig. 3. The interval of weight (*a*) and confidence (*b*) for criteria of controllers: *1* – SMH2010; *2* – SMH2010; *3* – SMH2G; *4* – SMH2G; *5* – SMH2G(I); *6* – SMH2G(II); *7* – TRIM5, SMH4, Matrix; *8* – TRIM5, SMH4, Matrix

факторами, тестовый процесс вычисления средних параметров быстродействия повторяют 1000 раз, затем получают среднее значение групп данных. Перед вычислением общего результата оценки необходимо определить достоверность и вес тринадцати критериев. После анализа определяют пороговые значения интервалов веса и достоверности. Диапазон значений веса и достоверности показан на рис. 3.

На рис. 4, *а* приведены степени достоверности всех тестовых операций (критериев) для каждого контроллера. На рис. 4, *б* показано эффективное быстродействие каждого контроллера в процессе тестов. Полученные данные принципиально отличаются от исходных внесением в результат экспертного веса и степени достоверности измерений. В данном случае быстродействие контроллера является оценкой его эффективности.



а

б

Рис. 4. Степень достоверности (*а*) и эффективное быстродействие (*б*) для критериев контроллеров: *1* – SMH2010; *2* – SMH2G; *3* – SMH2G(I); *4* – TRIM5, SMH4, Matrix

Fig. 4. Degrees of confidence (*a*) and effective performance (*b*) for the criteria of controllers: *1* – SMH2010; *2* – SMH2G; *3* – SMH2G(I); *4* – TRIM5, SMH4, Matrix

Заключение. Представленные методы и модели сложных информационных систем позволяют уменьшить влияние ошибок и помех в данных или неточности экспертных оценок. Для этого достоверность и вес критериев определяются пороговыми значениями интервала. В результате строится модель нелинейной оптимизации и дается оценка эффективности системы.

Анализ чувствительности, эффективности и веса критериев позволяет получить оценку эффективности каждой подсистемы или элемента. Кроме того, он используется для определения основных факторов, влияющих на результат оценки. Это дает возможность предусмотреть стратегию технического совершенствования системы и обслуживания для поддержания эффективности работы системы.

Литература

1. ***Исакова А. И., Кориков А. М., Левин С. М.*** Многокритериальный выбор на основе матрицы критериев при оценке эффективности программного обеспечения информационных систем // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23. № 4. С. 40–44. https://doi.org/10.21293/1818-0442-2020-23-4-40-44. – EDN: YKPCIO.

2. ***Жилин Р. А., Мельников А. В., Гарусов Ю. Н.*** Обоснование критерия корректности исходных данных при моделировании оценки эффективности слабоструктурированных альтернатив систем безопасности объектов органов внутренних дел // Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 2. С. 28–36. EDN: UYVYUI.

3. ***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

4. ***Лубенцов А. В.*** Использование каскадного метода анализа иерархий для оценки эффективности комплексной системы безопасности // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2022. № 4. С. 123–136. EDN: OCNMJX.

5. ***Грачев В. Л.*** Особенности экспресс-оценки эффективности автоматизированных систем оперативного управления в условиях неопределенности // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 1 (71). С. 41–44. https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2022.19.1.71.9.41. – EDN: ERDWQX.

6. ***Большедворская Л. Г., Корягин Н. Д.*** Разработка механизма оценки результативности и эффективности применения экспертных систем // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2021. № 3. С. 6–13. https://doi.org/10.51955/2312-1327_2021_3_6. – EDN: UPFMUI.

7. ***Пузырев А. М., Козырева Л. В.*** Разработка методики оценки профессиональных рисков в строительстве // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 1. С. 9–17. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-9-17. – EDN: MHEALH.

8. ***Соловьянова Д. В.*** Обзор процесса принятия решений в стандартных условиях, в условиях риска и неопределенности // Многополярный мир в фокусе новой действительности: материалы XIII Евраз. экон. форума молодежи (Екатеринбург, 24–28 апреля 2023 г.). Т. 2. Екатеринбург: Урал. гос. экон. ун-т, 2023. С. 183–186. EDN: UFENLZ.

9. ***Смирнов Е. Е., Поздняков А. А., Паршин М. С.*** Модель классификации объектов наблюдения в условиях пересечения их траекторий движения на основе совместного анализа траекторной и поляризационной информации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19. № 4. С. 14–26. https://doi.org/10.18127/j20700814-202104-02. – EDN: LONNYA.

10. ***Згуральская Е. Н.*** Повышение эффективности поиска скрытых закономерностей в базах данных применением интервальных методов на примерах в промышленности и других областях: дис. … канд. техн. наук. Ульяновск, 2021. 124 с. EDN: VHGNND.

11. ***Мурзинов А. В.*** Многокритериальный метод принятия управленческих решений // Записки декана [Электронный ресурс]. 19.03.2023. https://www.dekanblog.ru/2023/03/gimnastika-uma/mnogokriterialnyj-metod-prinyatiya-upravlencheskix-reshenij (дата обращения: 05.02.2024).

12. ***Штовба С. Д.*** Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB // Exponenta Pro: Математика в приложениях. 2023. № 2. С. 9–14.

13. ***Алпеев Е. В., Стадник А. Н., Скрыль С. В.*** Методика прогнозирования компьютерных атак на основе определения весов атрибутов компьютерной атаки с применением метода деревьев решений // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. № 6. С. 82–92. EDN: AHGTHG.

14. ***Шихалёв А. М., Хафизов И. И.*** Многокритериальные задачи принятия решений в управлении качеством: учеб. пособие. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2020. 91 с.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 04.12.2023 г.; принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторе

Лубенцов Александр Витальевич – кандидат географических наук, доцент кафедры основ радиотехники и электроники Воронежского института Федеральной службы исполнения наказаний России (Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1А), lubencov@mail.ru

References

1. Isakova A. I., Korikov A. M., Levin S. M. Multicriteria choice based on a matrix of criteria in assessing the software efficiency of information systems. *Doklady TUSUR = Proceedings of the TUSUR University*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 40–44. (In Russian). https://doi.org/10.21293/1818-0442-2020-23-4-40-44. – EDN: YKPCIO.

2. Zhilin R. A., Melnikov A. V., Garusov Yu. N. Substantiation of the criterion of correctness of initial data when modeling the evaluation of the efficiency of weakly structured alternatives of security systems of internal affairs objects. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Interior of Russia*, 2022, no. 2, pp. 28–36. (In Russian). EDN: UYVYUI.

3. 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

4. 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. 123–136. (In Russian). EDN: OCNMJX.

5. Grachev V. L. Express evaluation features of the automated operational management systems effectiveness in conditions of uncertainty. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti*, 2022, vol. 19, no. 1 (71), pp. 41–44. (In Russian). https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2022.19.1.71.9.41. – EDN: ERDWQX.

6. Bolshedvorskaya L. G., Koryagin N. D. Development of a mechanism for assessing the performance and efficiency of application of expert systems. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk = Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*, 2021, no. 3, pp. 6–13. (In Russian). https://doi.org/10.51955/2312-1327_2021_3_6. – EDN: UPFMUI.

7. Puzyrev A. M., Kozyreva L. V. Development of a methodology for assessing professional risks in construction. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh system = Safety of Technogenic and Natural Systems,* 2022, no. 1, pp. 9–17. (In Russian). https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-9-17. – EDN: MHEALH.

8. Solov'yanova D. V. A review of decision-making process under standard conditions, under risk and uncertainty. *Mnogopolyarnyy mir v fokuse novoy deystvitel'nosti,* proceedings of 13th Eurasian econ. forum of youth (Ekaterinburg, 24–28 Apr. 2023). Vol. 2. Ekaterinburg, Ural State Econ. Univ. Publ., 2023, pp. 183–186. (In Russian). EDN: UFENLZ.

9. Smirnov E. E., Pozdniakov A. A., Parshin M. S. Model of classification of observation objects under conditions of intersection of their motion paths based on joint analysis of trajectory and polarization information. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-Measuring and Control Systems*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 14–26. (In Russian). https://doi.org/10.18127/j20700814-202104-02. – EDN: LONNYA.

10. Zgural'skaya E. N. *Improvement of efficiency of data mining by using interval methods via examples of industry and other domains*, diss. for the Cand. Sci. (Eng.). Ulyanovsk, 2021. 124 p. (In Russian). EDN: VHGNND.

11. Murzinov A. V. Multi-criteria method of managerial decision making. *Zapiski dekana.* (In Russian). 19.03.2023. Available at: https://www.dekanblog.ru/2023/03/gimnastika-uma/mnogokriterialnyj-metod-prinyatiya-upravlencheskix-reshenij (accessed: 05.02.2024).

12. Shtovba S. D. Identification of nonlinear dependences using fuzzy interference in MATLAB system. *Exponenta Pro: Matematika v prilozheniyakh*, 2023, no. 2, pp. 9–14. (In Russian).

13. Alpeyev E. V., Stadnik A. N., Skryl S. V. A method of predicting computer attacks based on determining the weights of attributes of a computer attack using the decision tree method. *Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal "Nauchnyye trudy KubGTU" = Electronic network polythematic journal "Scientific Works of the Kuban State Technological University",* 2021, no. 6, pp. 82–92. (In Russian). EDN: AHGTHG.

14. Shikhalyov A. M., Khafizov I. I. *Multi-objective problems of decision making in quality management,* study guide. Kazan, Kazan State Univ. Publ., 2020. 91 p. (In Russian).

The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 04.12.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the author

Alexander V. Lubentsov – Cand. Sci. (Geog.), Assoc. Prof. of the Fundamentals of Radio Engineering and Electronics Department, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (Russia, 394072, Voronezh, Irkutskaya st., 1A), lubencov@mail.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

Научная статья
УДК 004.056.53
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-2-249-256
EDN: IBJUAT

О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности

I. Постановка задачи

В. А. Воеводин

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

vva541@mail.ru

Аннотация. Для принятия решения по обеспечению безопасности информационной инфраструктуры в целях ее устойчивого функционирования в условиях воздействия угроз органам управления требуется инструмент, позволяющий оценивать устойчивость функционирования ее отдельных элементов. Применение полумарковской модели в прямой постановке сопряжено с ростом сложности описания объекта моделирования в степенной прогрессии от числа учитываемых воздействий, что снижает ее практическую значимость. В работе сформулирована задача по поиску путей снижения дескриптивной сложности при моделировании. При поиске решения учтен имеющийся ресурс для восстановления функциональности поврежденных элементов и введены ограничения на количество воздействий, что позволяет снизить сложность моделирования. Результаты исследования расширяют знания о возможности приложения известных формальных методов полумарковского моделирования для оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры и служат основой для разработки соответствующей методики.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, устойчивость, информационная инфраструктура, функция живучести, угрозы информационной безопасности, элемент информационной инфраструктуры

Для цитирования: Воеводин В. А. О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. I. Постановка задачи // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 249–256. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-249-256. – EDN: IBJUAT.

© В. А. Воеводин, 2024

Original article

On the task of assessing the stability of the functioning of information infrastructure elements exposed to information security threats

I. Problem statement

V. A. Voevodin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

vva541@mail.ru

Abstract. In order for a decision to be made on information infrastructure security for the purposes of its stable functioning within the conditions of exposure to threats, the controls need a tool allowing the assessment of stability of its separate elements functioning. The application of semi-Markov model in a direct setting is associated with an increase in the complexity of simulation object description in step progression from the number of impacts considered, which lowers its practical significance. In this work, the problem of finding ways to reduce descriptive complexity in modeling is formulated. During search for solution the available resource to restore the functionality of the damaged elements has been considered and limits on the number of impacts have been introduced, which makes it possible to lower the simulation complexity. The research results broaden the knowledge about the possibility of applying known formal methods of semi-Markov modeling to assess the functioning stability of the information infrastructure elements and serve as a basis for the appropriate methodology development.

Keywords: automated control system, stability, information infrastructure, vitality function, information security threats, information infrastructure element

For citation: Voevodin V. A. On the task of assessing the stability of the functioning of information infrastructure elements exposed to information security threats. I. Problem statement. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 249–256. ttps://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-249-256. – EDN: IBJUAT.

Введение. Анализ угроз информационной безопасности (угроз) [1–3] позволяет утверждать, что большинство элементов информационной инфраструктуры (ИИ) будут подвергаться однократным воздействиям угроз, представляющим собой целенаправленные деструктивные воздействия [4, 5]. Предполагается, что общая продолжительность этих воздействий будет относительно невелика (от трех до семи суток). Вследствие этого приобретает актуальность задача разработки инструмента для оценивания устойчивости функционирования восстанавливаемого элемента, входящего в состав ИИ в условиях относительно непродолжительного периода воздействия угроз. Методы оценивания устойчивости функционирования элемента в штатных условиях сводятся к оцениванию надежности и приведены в работе [4].

Генезис понятия структурной устойчивости ИИ к воздействию целенаправленных угроз приводится в работе [5]. В рамках настоящей работы примем различие между

терминами «функциональность» и «работоспособность». Состояние элемента «работоспособен» характерно для штатных условий применения, которые зафиксированы и определены в технической и эксплуатационной документации на соответствующий элемент. Состояние «функционален» характерно для нештатных условий применения элемента и зависит от текущей обстановки и динамики требований к функциональности в зависимости от решаемой в текущий момент задачи и может не совпадать с пониманием состояния «работоспособен». Инструмент для оценивания устойчивости функционирования ИИ востребован лицами, принимающими решение по обеспечению устойчивости функционирования ИИ в целом.

Цель настоящей работы – формальная постановка задачи для оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры автоматизированной системы управления, подверженной воздействию угроз.

Вербальная постановка задачи. Пусть задана некая ИИ, которая содержит совокупность элементов для обеспечения информационного обмена с требуемым качеством. Формально ИИ может быть задана направленным графом с соответствующими полюсами. ИИ должна обеспечить обмен информацией между полюсами с требуемым качеством. С учетом этого графическая модель может быть представлена двух-, 1–*N*- или *N*–*N*-полюсниками.

В состав ИИ входят отдельные элементы, которые являются предпочтительными целями для воздействия угроз. При проектировании ИИ априори предусматриваются меры, обеспечивающие их базовую защищенность от воздействия угроз. Для обеспечения защищенности необходимо построить и поддерживать в готовности соответствующие рубежи защиты, что может быть спорным с точки зрения рентабельности ИИ. Тем не менее в составе ИИ предусматривается подсистема восстановления функциональности элементов. Данная подсистема имеет соответствующий производственный потенциал (ресурс) для восстановления нарушенного функционала ИИ, которое осуществляется посредством восстановления функциональности поврежденных элементов, входящих в ее состав. Однако для восстановления необходимо поддерживать и расходовать соответствующий ресурс такой подсистемы. Для принятия решения в данных условиях органам управления требуется инструмент, позволяющий оценить устойчивость функционирования отдельных элементов ИИ к воздействию угроз.

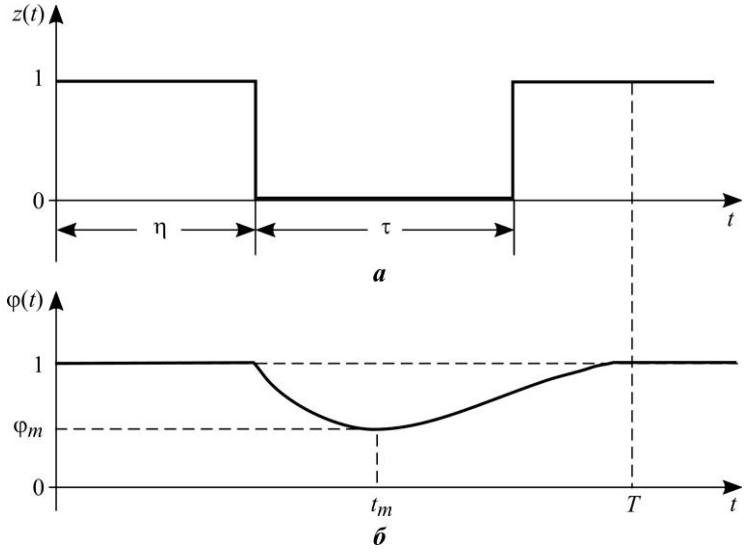
Анализ теоретического задела. Модели оценивания устойчивости функционирования элементов ИИ для условий многократного воздействия угроз исследованы ранее [5–7]. Для моделирования использованы методы теории полумарковских процессов. Получаемые модели характеризуются высокой сложностью, громоздки и трудно интерпретируемы лицом, принимающим решение. Если принять допущение, что воздействие угроз будет однократным, то моделирование можно значительно упростить и при этом получить достоверные оценки. В работе [8] приведена обобщенная формула для расчета функции устойчивости, которая положена в основу постановки и решения настоящей задачи исследования:

$$\nu(t) = 1 - PF(t) + P\int_0^t F(t-\tau)\, g(\tau)\, d\tau,$$

где P – оценка вероятности поражения элемента при однократном воздействии угрозы, осуществляемая либо на основании репрезентативной статистики, если таковая имеется, либо экспертными методами, либо посредством специальных исследований в ходе учений или деловых игр; $F(t) = P(\eta < t)$ – функция распределения случайного времени

до воздействия угрозы, вид и параметры которой определяются с помощью либо статистических методов, если имеется репрезентативная статистика, либо экспертных методов; η – случайное время до воздействия угрозы; $g(\tau) = G'(\tau < t)$ – плотность распределения случайного времени восстановления функциональности поврежденного элемента; $G(\tau < t)$ – интегральная функция распределения случайного времени восстановления функционала элемента; τ – случайное время восстановления требуемого функционала элемента.

Общий вид графиков изменения состояний $z(t)$ элемента и функции живучести $\varphi(t)$ при однократном воздействии угрозы приведен на рисунке. При $z(t) = 1$ считается, что элемент функционален, при $z(t) = 0$ – нефункционален.



Общий вид графиков восстановления функционала элемента (*а*)
и функции живучести (*б*) при однократном воздействии угрозы
General view of the graphs of the restoration of the element functional (*a*)
and the survivability function (*b*) with a single exposure to a threat

Для оценивания устойчивости функционирования ИИ для штатных условий имеется достаточный теоретический задел [4, 9, 10].

Допущение. Для решения задачи использовалась функция устойчивости элемента, характеризующая вероятность того, что элемент будет находиться в состоянии «функционален» в момент времени $t \in (0, T]$, где T – время окончания воздействия угроз. Функция устойчивости элемента представляется в виде произведения двух независимых функционалов [8]:

$$\nu\left(t, u, \Delta T, \lambda, \mu, \boldsymbol{P}\right) = K_{\text{о.г}}\left(t, u, \Delta T\right)\varphi\left(t, \lambda, \mu, \boldsymbol{P}\right),$$

где t – временной параметр оценивания функции устойчивости; $u = \{T_{\text{н}}, T_{\text{в}}\}$ – показатель надежности элемента, функционирующего в штатных условиях; $T_{\text{н}}$ – средняя наработка элемента на отказ; $T_{\text{в}}$ – среднее время восстановления работоспособности элемента; $\lambda = \{\boldsymbol{F}, n, T\}$ – характеристика угрозы; $\boldsymbol{F} = \{F_i(t)\}$ – семейство функций распределения интервалов времени η_i до очередного воздействия i-й угрозы; $F_i(t)$ – функция распределения i-го интервала времени η_i до воздействия i-й угрозы, $i = 1, 2, \ldots, n$; n – число угроз в серии; $\mu = \{\boldsymbol{G}\}$ – показатель восстанавливаемости

элемента; $\boldsymbol{G} = \{G_i(t)\}$, $i = 1, \ldots, n$, – совокупность функций распределения интервалов времени восстановления функциональности элемента после успешного воздействия i-й угрозы (оценка видов и параметров функций распределения $G_i(t)$ осуществляется либо с помощью экспертных методов, либо в результате соответствующих учений, деловых игр или специальных исследований); $\boldsymbol{P}$ – совокупность показателей, характеризующих способность элемента сохранять требуемый функционал в результате воздействия угроз (в качестве показателей принята совокупность вероятностей поражения элемента $\boldsymbol{P} = \{p_i\}$); p_i – вероятность поражения элемента при воздействии i-й угрозы, оцениваемая либо с помощью экспертных методов, либо в результате соответствующих учений, деловых игр или статистического моделирования, $i = 1, \ldots n$; $K_{\text{о.г}}(u, t) = K_{\text{г}}(u)\, P(t, \Delta T)$ – нестационарный коэффициент оперативной готовности элемента; $\Delta T = (0, T]$; $K_{\text{г}}(u)$ – коэффициент готовности элемента, рассчитанный для штатных условий; $P(t, \Delta T)$ – вероятность безотказной работы элемента в течение периода времени ΔT; $\varphi(t, \lambda, \mu, \boldsymbol{P})$ – функция живучести.

Значение $K_{\text{о.г}}(u)$ на периоде ΔT очень близко к единице, а значение функции живучести неизмеримо меньше: $\varphi(t, \lambda, \mu, \boldsymbol{P}) << K_{\text{о.г}}(u)$. С учетом этого формулу функции устойчивости элемента можно привести к виду

$$\nu(t, \lambda, \mu, u, \boldsymbol{P}) \approx \varphi(t, \lambda, \mu, \boldsymbol{P}),$$

т. е. функция устойчивости может быть приближенно заменена функцией живучести.

Ограничение. Процесс завершается восстановлением функциональности элемента при условии, что $\Pi_{r_n}(t) \le \Pi_{r_0}(t)$, где $\Pi_{r_0}(t)$ – показатель производственных возможностей подсистемы восстановления; $\Pi_{r_n}(t)$ – показатель, характеризующий требуемые возможности расчета восстановления к моменту времени t. Общая постановка задачи по исследованию производственных возможностей подсистемы восстановления и требуемого ресурса для восстановления приведена в работах [5, 7]. Условие перехода процесса в поглощающее состояние «нефункционален по исчерпании ресурса восстановления» характеризуется тем, что требуемый ресурс по любой из составляющих будет больше, чем имеется в наличии на момент времени t, $\Pi_{r_n}(t) > \Pi_{r_0}(t)$.

Для определения функции устойчивости целесообразно выбирать угрозу из совокупности актуальных, для которой соотношение $\chi_i = p_i\tau$ приобретает максимальное значение, где χ_i – коэффициент разрушающего воздействия i-й угрозы. Для оценивания выбирается самая разрушающая (опасная) из совокупности угроз $\chi_i = \max\limits_{i \in I} \chi_i$, где I – совокупность актуальных угроз. Функция живучести φ_m имеет наименьшее значение в момент времени t_m на интервале времени $(0, T]$. Принимается, что в течение этого интервала угроза может быть реализована один раз. Конкретный вид функции живучести, ее минимальное значение φ_m и соответствующий ему момент времени t_m будут зависеть от характеристик воздействия угрозы и подсистемы восстановления.

В условиях высокой информационной неопределенности моментов воздействия угроз на интервале $(0, T]$ и требуемой достоверности оценки целесообразно рассмотреть при решении задачи два аппроксимирующих закона распределения: экспоненциальный и/или равномерный. Вопросам исследования функции живучести для элементов критической ИИ посвящены работы [11–17]. Однако вопросы количественного оценивания уровня устойчивости функционирования с помощью математических моделей рассмотрены недостаточно глубоко для их практического применения.

Заключение. Предложенная постановка задачи поиска способов снижения сложности моделирования при обеспечении требуемой достоверности позволяет осуществлять целенаправленный поиск решения по снижению сложности математической модели, приведенной в работах [5, 7].

Литература

1. ***Новохрестов А. К., Конев А. А., Шелупанов А. А., Егошин Н. С.*** Модель угроз безопасности информации и ее носителей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 12 (131). С. 93–104. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-93-104. – EDN: YLCSYL.

2. ***Попов К. В., Шелупанова П. А.*** Информационные системы для анализа угроз национальной безопасности // Доклады ТУСУР. 2022. Т. 25. № 4. С. 71–79. https://doi.org/10.21293/1818-0442-2022-25-4-71-79. – EDN: QSOWKW.

3. ***Ross R., Johnson L.*** Guide for assessing the security controls in federal information systems and organizations: Building effective security assessment plans, special publ. 800-53A, rev. 1 // National Institute of Standards and Technology [Электронный ресурс]. June 2010. URL: https://www.nist.gov/publications/guide-assessing-security-controls-federal-information-systems-and-organizations (дата обращения: 07.02.2024).

4. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. Т. 5: Проектный анализ надежности / под ред. ***В. И. Патрушева, А. И. Рембезы***. М.: Машиностроение, 1988. 320 с.

5. ***Воеводин В. А.*** Генезис понятия структурной устойчивости информационной инфраструктуры автоматизированной системы управления производственными процессами к воздействию целенаправленных угроз информационной безопасности // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 2. С. 30–41. EDN: ONODLF.

6. ***Воеводин В. А., Виноградов И. В., Волков Д. И.*** Об оценке устойчивости функционирования объекта информатизации в условиях компьютерных атак при экспоненциальном законе распределения времени до воздействия противника и восстановления работоспособности // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Т. 49. № 3. С. 39–51. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51. – EDN: OXAJIF.

7. ***Воеводин В. А.*** Модель оценки функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры для условий воздействия множества компьютерных атак // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 3. С. 691–715. https://doi.org/10.15622/ia.22.3.8. – EDN: TYBZND.

8. ***Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.*** Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М.: Наука, 1965. 524 с.

9. ***Кульба В. В., Сомов С. К., Шелков А. Б.*** Анализ влияния использования информационной избыточности на показатели надежности распределенных информационных систем // Надежность. 2022. № 1. С. 4–12. https://doi.org/ 10.21683/1729-2646-2022-22-1-4-12. – EDN: NTHKAS.

10. ***Ефремов В. А., Мищенко В. И., Мищенко И. В.*** Полумарковская модель процесса функционирования средств измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3 (41). С. 29–38. https://doi.org/10.21685/2307-5538-2022-3-3. – EDN: TJNRNO.

11. ***Недосекин А. О., Виноградов В. В.*** Оценка динамической функциональной живучести технической системы в условиях неопределенности // Мягкие измерения и вычисления. 2017. № 1 (1). С. 58–64. EDN: XUXITZ.

12. ***Гавдан Г. П., Иваненко В. Г., Рыбалко Э. П., Рыбалко Д. П.*** Устойчивость функционирования объектов критической информационной инфраструктуры // Безопасность информационных технологий. 2022. Т. 29. № 4. С. 53–66. https://doi.org/10.26583/bit.2022.4.05. – EDN: OKPDVN.

13. ***Антонов С. Г., Анциферов И. И., Климов С. М.*** Методика инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при информационно-технических воздействиях // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 35–41. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-35-41. – EDN: UKLVWW.

14. Resilience metrics for cyber systems / ***I. Linkov, D. A. Eisenberg, K. Plourde et al.*** // Environ. Syst. Decis. 2013. Vol. 33. P. 471–476. https://doi.org/10.1007/s10669-013-9485-y

15. ***Kott A., Linkov I.*** To improve cyber resilience, measure it // Computer. 2021. Vol. 54. Iss. 2. P. 80–85. https://doi.org/10.1109/MC.2020.3038411

16. Development of an adaptive TCP algorithm based on machine learning in telecommunication networks / ***I. L. Afonin, A. V. Gorelik, S. S. Muratchaev et al.*** // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Yaroslavl: IEEE, 2019. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814023

17. Applying of TCP-based protocols for mobile ad-hoc networks with PN signals in NS-3 / ***A. S. Volkov, A. A. Bakhtin, A. V. Ugrovatov et al.*** // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Minsk: IEEE, 2018. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457059

Статья поступила в редакцию 13.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 20.11.2023 г.; принята к публикации 12.02.2024 г.

Информация об авторе

Воеводин Владислав Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vva541@mail.ru

References

1. Novokhrestov A. K., Konev A. A., Shelupanov A. A., Egoshin N. S. Information and information carrier security threat model. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 12 (131), pp. 93–104. (In Russian). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-93-104. – EDN: YLCSYL.

2. Popov K. V., Shelupanova P. A. Information systems for national security threat analysis. *Doklady TUSUR = Proceedings of the TUSUR University*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 71–79. (In Russian). https://doi.org/10.21293/1818-0442-2022-25-4-71-79. – EDN: QSOWKW.

3. Ross R., Johnson L. Guide for assessing the security controls in federal information systems and organizations: Building effective security assessment plans, special publ. 800-53A, rev. 1. *National Institute of Standards and Technology*. June 2010. Available at: https://www.nist.gov/publications/guide-assessing-security-controls-federal-information-systems-and-organizations (accessed: 07.02.2024).

4. *Industrial product dependability and effectiveness*, reference book, in 10 vol. Vol. 5. *Project analysis of dependability*, eds V. I. Patrushev, A. I. Rembeza. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988. 320 p. (In Russian).

5. Voevodin V. A. The genesis of the concept of structural stability of the information infrastructure of an automated production process management system to the impact of targeted threats to information security. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service*, 2023, no. 2, pp. 30–41. (In Russian). EDN: ONODLF.

6. Voevodin V. A., Vinogradov I. V., Volkov D. I. About the informatization object functioning stability assessment in conditions of computer attacks at exponential distribution law of time before the enemy's impact. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 39–51. (In Russian). https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51. – EDN: OXAJIF.

7. Voevodin V. A. A model for assessing the functional stability of information infrastructure elements for conditions of exposure to multiple computer attacks. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2023, vol. 22, no. 3, pp. 691–715. (In Russian). https://doi.org/10.15622/ia.22.3.8. – EDN: TYBZND.

8. Gnedenko B. V., Belyayev Yu. K., Solov'yev A. D. *Mathematical methods in reliability theory. Basic failure properties and their statistical analysis.* Moscow, Nauka Publ., 1965. 524 p. (In Russian).

9. Kulba V. V., Somov S. K., Shelkov A. B. Analysing the effect of information redundancy on the dependability indicators of distributed information systems. *Nadezhnost' = Dependability,* 2022, vol. 22, no. 1, pp. 4–12. (In Russian). https://doi.org/ 10.21683/1729-2646-2022-22-1-4-12. – EDN: NTHKAS.

10. Efremov V. A., Mishchenko V. I., Mishchenko I. V. Semi-Markov model of the functioning process measuring instruments. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2022, no. 3 (41), pp. 29–38. (In Russian). https://doi.org/10.21685/2307-5538-2022-3-3. – EDN: TJNRNO.

11. Nedosekin A. O., Vinogradov V. V. Evaluating the dynamic functional survivability of a technical system in a context of uncertainty. *Myagkiye izmereniya i vychisleniya = Soft Measurements and Computing*, 2017, no. 1 (1), pp. 58–64. (In Russian). EDN: XUXITZ.

12. Gavdan G. P., Ivanenko V. G., Rybalko E. P., Rybalko D. P. Sustainability of the functioning of critical information infrastructure facilities. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy = IT Security (Russia),* 2022, vol. 29, no. 4, pp. 53–66. (In Russian). https://doi.org/10.26583/bit.2022.4.05. – EDN: OKPDVN.

13. Antonov S. G., Antsiferov I. I., Klimov S. M. Method of instrumental estimation of critical information infrastructure under information technology interference. *Nadezhnost' = Dependability,* 2020, vol. 20, no. 4, pp. 35–41. (In Russian). https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-35-41. – EDN: UKLVWW.

14. Linkov I., Eisenberg D. A., Plourde K., Seager Th. P., Allen J., Kott A. Resilience metrics for cyber systems. *Environ. Syst. Decis.*, 2013, vol. 33, pp. 471–476. https://doi.org/10.1007/s10669-013-9485-y

15. Kott A., Linkov I. To improve cyber resilience, measure it. *Computer*, 2021, vol. 54, iss. 2, pp. 80–85. https://doi.org/10.1109/MC.2020.3038411

16. Afonin I. L., Gorelik A. V., Muratchaev S. S., Volkov A. S., Morozov E. K. Development of an adaptive TCP algorithm based on machine learning in telecommunication networks. *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO).* Yaroslavl, IEEE, 2019, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814023

17. Volkov A. S., Bakhtin A. A., Ugrovatov A. V., Volkova E. A., Shalyagin D. V. Applying of TCP-based protocols for mobile ad-hoc networks with PN signals in NS-3. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO).* Minsk, IEEE, 2018, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457059

The article was submitted 13.10.2023; approved after reviewing 20.11.2023;
accepted for publication 12.02.2024.

Information about the author

Vladislav A. Vojvodin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Information Security Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vva541@.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): https://www.ural-press.ru/catalog
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- **через Агентство** «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- **через редакцию** – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

ЮБИЛЕИ

Лабунову Владимиру Архиповичу – 85 лет



16 марта 2024 г. исполнилось 85 лет Владимиру Архиповичу Лабунову, известному ученому в области микро- и наноэлектроники, академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору.

В 1961 г. В. А. Лабунов окончил Белорусский политехнический институт, два года работал на Минском электромеханическом заводе инженером-конструктором радиоэлектронных систем. В 1966 г. Владимир Архипович защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 1971 г. – на соискание ученой степени доктора технических наук. В 1977 г. В. А. Лабунову присвоено звание профессора.

С 1975 по 1994 г. Владимир Архипович заведовал кафедрой микроэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР). В 1975 г. на базе кафедры микроэлектроники открыта первая в СССР Проблемная лаборатория «Электрохимические и плазменные процессы в микроэлектронике».

В 1982 г. Владимир Архипович избран членом-корреспондентом Академии наук Белорусской ССР (АН БССР), в 1986 г. – действительным членом АН БССР. С 1987 по 1989 г. В. А. Лабунов – академик-секретарь Отделения физики, математики и информатики АН БССР. В. А. Лабунов дважды избирался членом Президиума АН БССР и Национальной академии наук Беларуси.

С 1994 по 2001 г. В. А. Лабунов – чрезвычайный и полномочный посол Республики Беларусь в странах Западной Европы – Бельгии, Нидерландах и Люксембурге. В период работы постоянным представителем Республики Беларусь при Европейских сообществах В. А. Лабунов уделял большое внимание продвижению интересов белорусской науки в научно-технические программы Европейской комиссии (ЕК), такие как четвертая и пятая рамочные НТП ЕК, INCO, INCOCOPERNICUS, INTAS, ESPRIT, COST, EUREKA, научная программа НАТО «Наука ради мира».

С 2001 г. по настоящее время В. А. Лабунов – заведующий лабораторией «Интегрированные микро- и наносистемы» БГУИР. Работы, проводимые в БГУИР непосредственно под руководством Лабунова В. А., посвящены разработке и исследованию наноэлектронных компонентов для нового поколения информационных и коммуникационных систем. В 2012 г. В. А. Лабунов избран почетным членом Нанотехнологического общества России, в 2016 г. – иностранным членом Российской академии наук.

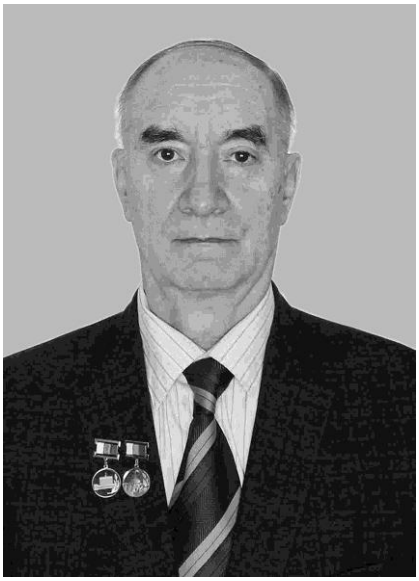
Результаты научных исследований В. А. Лабунова изложены более чем в 400 научных публикациях и защищены 500 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения СССР. Под руководством В. А. Лабунова подготовлено 78 кандидатов и 12 докторов наук, создана научная школа в БГУИР.

В. А. Лабунов удостоен 1-й премии Президиума Академии наук СССР «За лучшую фундаментальную разработку в области микроэлектроники», награжден орденами Трудового Красного Знамени, Октябрьской Революции, ему присвоены звания «Заслуженный изобретатель Белорусской ССР», лауреата Государственной премии Республики Беларусь.

Поздравляем Владимира Архиповича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов в научной деятельности!

Редколлегия

Петросянцу Константину Орестовичу – 80 лет



9 апреля 2024 г. исполнилось 80 лет Константину Орестовичу Петросянцу, ведущему отечественному специалисту в области моделирования приборов и технологических процессов полупроводниковой электроники, доктору технических наук, профессору.

К. О. Петросянц окончил Московский институт электронного машиностроения в 1968 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1985 г. – докторскую. С 1968 по 1972 г. работал в ОНИЛ микроэлектроники МЭП при МИЭМ инженером, младшим научным сотрудником. С 1972 по 1993 г. – на кафедре микроэлектроники ассистентом, старшим преподавателем, доцентом, профессором, с 1993 по 2012 г. – заведующим кафедрой электроники и электротехники и деканом факультета автоматики и вычислительной техники МИЭМ. В 2012 г. переведен в МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики» на должность заведующего кафедрой электроники и наноэлектроники. В 2013 г. Константину Орестовичу присвоено почетное звание ординарного профессора ВШЭ. В настоящее время К. О. Петросянц – профессор-исследователь департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики» и заместитель руководителя департамента по микроэлектронике.

Разработанные К. О. Петросянцем модели полупроводниковых приборов и элементов ИС использовались для создания более 30 типов микросхем и электронной аппаратуры, выпускаемых серийно на предприятиях СССР и РФ. Константин Орестович внес значительный вклад в подготовку инженеров в области электроники и вычислительной техники для предприятий МЭП, МРП, МПСС, Росатома, Роскосмоса, Минобороны СССР и РФ.

К. О. Петросянц – руководитель сформированной им научно-педагогической школы. Подготовил 16 кандидатов и 4 докторов наук. Организовал учебно-научные центры: с корпорацией Motorola (США) по электронным компонентам; фирмой Mentor Graphics (США) по САПР печатных плат, мультичипов и БИС; фирмой Synopsys (США / Швейцария) по моделированию полупроводниковых приборов, которые функционировали под его руководством.

Константин Орестович – автор более 330 научных трудов, из них 5 монографий и 18 авторских свидетельств и патентов.

К. О. Петросянц широко известен за рубежом: регулярно выступает на крупных зарубежных конференциях и симпозиумах, его приглашают для научных консультаций и чтения лекций в ведущие технические университеты и научные центры Германии, Испании, Финляндии, Индии, Венгрии, Чехии.

В настоящее время Константин Орестович Петросянц руководит комплексом работ по приборно-технологическому и схемотехническому проектированию радиационно стойкой и термостойкой электронной компонентной базы.

Константин Орестович – эксперт Российской академии наук по вопросам микроэлектроники, член редколлегий журналов «Известия высших учебных заведений. Электроника» и «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы».

К. О. Петросянц – дважды лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники (1999 г.) и в области образования (2016 г.), ему присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», награжден отраслевой медалью А. В. Красилова за вклад в создание новых приборов твердотельной электроники.

Поздравляем Константина Орестовича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов в научной и педагогической деятельности!

Редколлегия

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал **«Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА»** публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- **фундаментальные исследования;**
- **материалы электроники;**
- **технологические процессы и маршруты;**
- **элементы интегральной электроники;**
- **схемотехника и проектирование;**
- **микро- и наносистемная техника;**
- **интегральные радиоэлектронные устройства;**
- **биомедицинская электроника;**
- **информационно-коммуникационные технологии;**
- **проблемы высшего образования.**

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в двух экземплярах.***
2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.
3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).
4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: http://ivuz-e.ru/authors/

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна 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