



DOI: 10.32603/1993-8985

ISSN 1993-8985 (print)
ISSN 2658-4794 (online)

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 28 № 2 2025



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 28 No. 2 2025

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2025

Saint Petersburg
ETU Publishing house

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ № ФС77-74297 от 09.11.2018 г.).

Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») Журнал основан в 1998 г.

Издается 6 раз в год.

Включен в RSCI на платформе Web of Science, Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine,

Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ); соответствует декларации Budapest Open Access Initiative, является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Crossref.

Редакция журнала:

197022, Санкт-Петербург,

ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А. В. СОЛОМОНОВ, д.ф.-м.н., проф.,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

В. М. КУТУЗОВ, д.т.н., советник ректората, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Dieter H. BIMBERG, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. C. Mult., исполн. директор "Bimberg Center of Green Photonics", Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики КАН, Чанчунь, Китай

Matthias A. HEIN, PhD, Dr Rer. Nat. Habil., Prof., Технический университет, Ильменау, Германия

Jochen HORSTMANN, PhD, Dr Rer. Nat., директор департамента, Гельмгольц-центр, Гестахт, Германия

Erkki LANDERANTA, PhD, Prof., Технический университет, Лаппеенранта, Финляндия

Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Prof., Автономный университет, Барселона, Испания

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Prof., Варшавский технологический университет, Институт электронных систем, Варшава, Польша

Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Prof., Университет Зигена, Зиген, Германия

А. Г. ВОСТРЕЦОВ, д.т.н., проф., Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

А.Ю. ЕГОРОВ, д. ф.-м. н., член-корр. РАН, ООО «Коннектор Оптик», С.-Петербург, Россия

С. Т. КНЯЗЕВ, д.т.н., доц., Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Д. А. КОЗОДАЕВ, к. ф.-м. н., генеральный директор NT-MDT BV LLC, Апелдорн, Нидерланды

А. Н. ЛЕУХИН, д.ф.-м.н., проф., Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Россия

С. Б. МАКАРОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург, Россия

Л. А. МЕЛЬНИКОВ, д.ф.-м.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

А. А. МОНАКОВ, д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), С.-Петербург, Россия

А. А. ПОТАПОВ, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Н. М. РЫСКИН, д.ф.-м.н., гл.н.с., Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов, Россия

С. В. СЕЛИЩЕВ, д.ф.-м.н., проф., НИУ "Московский институт электронной техники", Москва, Россия

А. Л. ТОЛСТИХИНА, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва, Россия

А. Б. УСТИНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

В. А. ЦАРЕВ, д.т.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

Н. К. ЮРКОВ, д.т.н., проф., Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Ю. В. ЮХАНОВ, д.т.н., проф., Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

С. Е. ГАВРИЛОВ, к.т.н., доц., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

Цель журнала – освещение актуальных проблем, результатов прикладных и фундаментальных исследований, определяющих направление и развитие научных исследований в области радиоэлектроники

Журнал выполняет следующие задачи:

- предоставлять авторам возможность публиковать результаты своих исследований;
- расширять сферу профессионального диалога российских и зарубежных исследователей;
- способствовать становлению лидирующих мировых

позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;

- знакомить читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок;
- привлекать перспективных молодых специалистов к научной работе в сфере радиоэлектроники;
- информировать читателей о проведении симпозиумов, конференций и семинаров в области радиоэлектроники



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0



JOURNAL OF THE RUSSIAN UNIVERSITIES. RADIOELECTRONICS ***IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII ROSSII. RADIOELEKTRONIKA***

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (PI № FS77-74297 from 09.11.2018).
Subscription index in JSC "Post of Russia" catalogue is П4296
Founder and publisher: Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU)
Founded in 1998. Issued 6 times a year.
The journal is included in RSCI (Web of Science platform), Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

The journal is indexed and archived in the Russian science citation index (RSCI).
The journal complies with the Budapest Open Access Initiative Declaration, is a member of the Directory of Open Access Journals (DOAJ) and Crossref.

Editorial address:

ETU, 5F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia
Tel.: +7 (812) 234-10-13
E-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU**
© ETU, design, 2020

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

Alexander V. SOLOMONOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

Vladimir M. KUTUZOV, Dr Sci. (Eng.), Rector Adviser, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

EDITORIAL BOARD:

Dieter H. BIMBERG, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. c. mult., Executive Director of the "Bimberg Center of Green Photonics", Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics CAS, Changchun, China

Anton Yu. EGOROV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, correspondent member RAS, Connector Optics LLC, St. Petersburg, Russia

Matthias A. HEIN, PhD, Dr. Rer. Nat. Habil., Professor, Technical University, Ilmenau, Germany

Jochen HORSTMANN, PhD, Dr. Rer. Nat., Head of the Department of Radar Hydrography, Institute for Coastal Research, Helmholtz Zentrum Geesthacht, Geesthacht, Germany

Sergey T. KNYAZEV, Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Dmitry A. KOZODAEV, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), NT-MDT BV LLC (CEO), Apeldoorn, Netherlands

Erkki LAHDERANTA, PhD, Professor, Technical University, Lappeenranta, Finland

Anatolii N. LEUKHIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

Sergey B. MAKAROV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Institute of Physics, Nanotechnology and Telecommunication St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Professor, Autonomous University, Barcelona, Spain

Leonid A. MELNIKOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Andrei A. MONAKOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

Alexander A. POTAPOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS, Moscow, Russia

Nikita M. RYSKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Saratov, Russia

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Professor, Warsaw University of Technology, Institute of Electronic Systems, Warsaw, Poland

Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Professor, University of Siegen, Siegen, Germany

Sergey V. SELISHCHEV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

Alla L. TOLSTIKHINA, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Divisional Manager, Institute of Crystallography named after A. Shubnikov RAS, Moscow, Russia

Vladislav A. TSAREV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia

Aleksey B. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

Aleksey G. VOSTRETISOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Yury V. YUKHANOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Nikolay K. YURKOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Penza State University, Penza, Russia

EXECUTIVE SECRETARY

Stanislav E. GAVRILOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

The journal is aimed at the publication of actual applied and fundamental research achievements in the field of radioelectronics.

Key Objectives:

- provide researchers in the field of radioelectronics with the opportunity to promote their research results;
- expand the scope of professional dialogue between Russian and foreign researchers;
- promote the theoretical and practical achievements of Russian scientists in the field of radioelectronics at the international level;

- acquaint readers with international best practices in the implementation of scientific results;
- attract promising young specialists to scientific work in the field of radioelectronics;
- inform readers about symposia, conferences and seminars in the field of Radioelectronics



All the materials of the journal are available under a Creative Commons Attribution 4.0 License

СОДЕРЖАНИЕ

Научные статьи

Проектирование и технология радиоэлектронных средств

- Морозов С. Р., Газизов Т. Р. Анализ асимметричных структур
с трехкратным модальным резервированием.....6

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

- Станковский А. В., Поленга С. В., Стригова Е. А., Немшон А. Д., Гафаров Е. Р.,
Саломатов Ю. П. Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра
и их применение в антенных решетках проходного типа.....20

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

- Парфенов В. И., Буй Ч. Т. Алгоритмы комплексного обнаружения объектов
в беспроводных сенсорных сетях.....33

Радиолокация и радионавигация

- Купряшкин И. Ф. Анализ классификационных признаков объектов военной техники набора
MSTAR, выявляемых глубокой сверточной нейронной сетью в процессе обучения.....45

Микро- и нанoeлектроника

- Мыльников И. Л., Сошников И. П., Дедык А. И., Павлова Ю. В., Анохин А. С.,
Еськов А. В., Белявский П. Ю., Антонова А. С., Семенов А. А. Влияние размеров зерен
на температурный гистерезис керамического титаната бария.....57

- Александров О. В., Морозов Н. Н. Модель асимметричного сдвига
порогового напряжения МОП-структур при термополевых обработках.....69

- Мадисон А. Е., Мадисон П. А., Мошников В. А., Соломонов А. В.
Модульный дизайн интерфейсов в наноструктурах из квазикристаллических блоков.....80

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

- Сидорова С. В., Пименов И. Е., Купцов А. Д., Фельде А. А.
Формирование в вакууме композиционного слоя с островковыми наноструктурами.....94

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

- Баронова В. А., Романцова Н. В. Применение технологии цифрового двойника
в информационно-измерительных системах.....107

От редакции

- Правила для авторов статей.....117

CONTENTS

Original articles

Engineering Design and Technologies of Radio Electronic Facilities

Morozov S. R., Gazizov T. R. Analysis of Asymmetric Structures with Triple Modal Reservation.....6

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Stankovsky A. V., Polenga S. V., Strigova Ye. A., Nemshon A. D., Gafarov E. R., Salomatov Yu. P. Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter and Their Application in Transmitarray Antenna.....20

Telecommunication Systems, Networks and Devices

Parfenov V. I., Bui T. T. Algorithms for Integrated Object Detection in Wireless Sensor Networks.....33

Radar and Navigation

Kupryashkin I. F. Analysis of MSTAR Object Classification Features Extracted by a Deep Convolutional Neural Network.....45

Micro- and Nanoelectronics

Mylnikov I. L., Soshnikov I. P., Dedyk A. I., Pavlova Yu. V., Anokhin A. S., Es'kov A. V., Belyavskiy P. Yu., Antonova A. S., Semenov A. A. Effect of Grain Sizes on Temperature Hysteresis of Ceramic Barium Titanate.....57

Aleksandrov O. V., Morozov N. N. Modeling Asymmetric Shift in the Threshold Voltage of MOS Structures under Thermal Field Treatment.....69

Madison A. E., Madison P. A., Moshnikov V. A., Solomonov A. V. Modular Design of Interfaces in Nanostructures from Quasicrystalline Blocks.....80

Quantum, Solid-State, Plasma and Vacuum Electronics

Sidorova S. V., Pimenov I. E., Kouptsov A. D., Felde A. A. Composite Layer Formation with Island Nanostructures in Vacuum.....94

Metrology, Information and Measuring Devices and Systems

Baronova V. A., Romantsova N. V. Application of Digital Twin Technology in Information and Measurement Systems.....107

From the Editor

Author's Guide.....117

Анализ асимметричных структур с трехкратным модальным резервированием

С. Р. Морозов[✉], Т. Р. Газизов

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

[✉] pred11072@yandex.ru

Аннотация

Введение. Для повышения надежности и функциональной безопасности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) разработан новый подход к резервированию электрических цепей, называемый модальным резервированием (МР). Его особенностью является использование сильной электромагнитной связи между проводниками, за счет чего удастся повысить надежность и обеспечить электромагнитную совместимость разрабатываемого устройства. Общепринятым способом построения печатных плат (ПП) с МР является использование структуры, выполненной с сохранением зеркальной симметрии по вертикальной, а в некоторых случаях – и по горизонтальной оси. Между тем асимметричные варианты компоновок ПП с МР ранее не рассматривались.

Цель работы. Сравнение ПП с трехкратным МР, построенных при симметричных и асимметричных вариантах компоновки для выявления полезных эффектов во временной области.

Материалы и методы. Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC без учета потерь в проводниках и диэлектриках. В качестве исходной структуры с трехкратным МР выбрана зеркально-симметричная четырехпроводная линия передачи с боковой и лицевой связями.

Результаты. По результатам работы не было обнаружено асимметричных наборов параметров, ослабляющих помеховый импульс более симметричных наборов (1 и 2) при всех возможных вариантах отказа. Однако обнаружены наборы (8, 9 и 12), при которых удастся достичь в 2.38, 2.75 и 2.22 раза соответственно большее значение $\Delta\tau_{\min}$, чем при наборе 1 (значение $\Delta\tau_{\min}$ которого больше, чем при симметричном наборе 2).

Заключение. Обнаруженные наборы 8, 9 и 12 показывают, что компоновку $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$ возможно использовать для уменьшения вероятности наложения импульсов на реальном устройстве, а также для выполнения ПП меньшей длины по сравнению с симметричным вариантом без риска наложения импульсов. Полученные данные можно использовать как рекомендации при трассировке макетов ПП в ситуациях, когда необходимо увеличить разность задержек.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиоэлектронная аппаратура, печатная плата, модальная фильтрация, модальное резервирование

Для цитирования: Морозов С. Р., Газизов Т. Р. Анализ асимметричных структур с трехкратным модальным резервированием // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 6–19.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-6-19

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке российского научного фонда № 24-29-00579 (<https://rscf.ru/project/24-29-00579/>) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Благодарности. Авторы благодарны Медведеву А. В. за помощь в работе.

Статья поступила в редакцию 15.08.2024; принята к публикации после рецензирования 13.01.2025; опубликована онлайн 30.04.2025

Analysis of Asymmetric Structures with Triple Modal Reservation

Sergey R. Morozov[✉], Talgat R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

[✉] pred11072@yandex.ru

Abstract

Introduction. An original approach to electrical circuit reservation, referred to as modal reservation (MR), is developed with the purpose of increasing the reliability and functional safety of radio electronic equipment (REA). A specific feature of this method consists in the use of strong electromagnetic coupling between the conductors, thereby increasing the reliability and ensuring the electromagnetic compatibility of the device under development. Printed circuit boards (PCBs) with MR are conventionally constructed using a structure designed to maintain mirror symmetry along the vertical, and, in some cases, along the horizontal axis. Meanwhile, asymmetrical options for PCB layouts with MR have not been previously considered.

Aim. To compare triple MR PCBs constructed using symmetrical and asymmetrical layout options to identify beneficial effects in the time domain.

Materials and methods. Simulations were carried out in the TUSUR.EMC software environment without considering losses in the conductors and dielectrics. A mirror-symmetrical four-wire transmission line with edge and broad-side couplings was selected as the initial triple MR design.

Results. No asymmetric sets of parameters that would attenuate the interference pulse of more symmetric sets (1 and 2) were found for all possible failure scenarios. However, sets 8, 9, and 12 allowed 2.38, 2.75, and 2.22 times higher $\Delta\tau_{\min}$ values to be achieved compared to set 1 (whose $\Delta\tau_{\min}$ value was greater than with symmetric set 2).

Conclusion. The discovered sets 8, 9, and 12 show that the arrangement $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$ can be used to reduce the probability of pulse overlap on actual devices, as well as to implement shorter-length PCBs compared to the symmetrical option without the risk of pulse overlap. The data obtained can be used when tracing PCB layouts in situations requiring an increase in the delay difference.

Keywords: electromagnetic compatibility, radio electronic equipment, printed circuit board, modal filtering, modal reservation

For citation: Morozov S. R., Gazizov T. R. Analysis of Asymmetric Structures with Triple Modal Reservation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 6–19.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-6-19

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The research was supported by the Russian Science Foundation No. 24-29-00579 (<https://rscf.ru/project/24-29-00579/>) in Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Acknowledgements. The authors is grateful to A. V. Medvedev for assistance in the work.

Submitted 15.08.2024; accepted 13.01.2025; published online 30.04.2025

Введение. При создании печатных плат (ПП) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) большое внимание уделяется электромагнитной совместимости (ЭМС) и функциональной безопасности [1] при воздействии электромагнитных помех (ЭМП). Особо опасны кондуктивные сверхширокополосные (СШП) помехи, которые имеют высокое напряжение, малую длительность и широкий спектр. СШП-помехи могут проникать в РЭА по цепям питания и приводить к выгоранию компонентов, а следовательно – к выходу РЭА из

строения. Функциональная безопасность РЭА при воздействии ЭМП, в частности, СШП-помех, крайне важна. Поэтому необходимо использовать подходы, при которых методы обеспечения ЭМС интегрированы в конструкцию РЭА, схемотехнику электронных схем, электронную компонентную базу и связаны с методами обеспечения функциональной безопасности.

Для обеспечения функциональной безопасности часто используют резервирование [2, 3]. При распространении ЭМП в РЭА резервиро-

вания может оказаться недостаточно. Тогда его можно расширить электромагнитным разнообразием [4], чтобы создать различное поведение под воздействием одной и той же ЭМП. Это разнообразие достигается такими методами, как использование различных архитектур (процессоров, памяти), инверсия данных и сигналов, различная реализация одного и того же алгоритма и десинхронизация компонентов как в аппаратном, так и в программном обеспечении. Один из вариантов обеспечения электромагнитного разнообразия – пространственное разнесение резервируемых ПП. В [5, 6] показано, что от расположения резервируемых проводников или ПП друг относительно друга зависят как надежность, так и обеспечение ЭМС.

На основе холодного резервирования разработан новый подход к компоновке и трассировке резервируемых проводников одноименных цепей для ослабления влияния ЭМП малой длительности, называемый модальным резервированием (МР) [7]. При таком подходе резервируемая и резервные цепи образуют модальный фильтр (МФ) [8–11]. МР позволяет уменьшить габариты резервируемых и резервных систем, а также снизить уровень воздействия кондуктивных ЭМП и восприимчивость рассматриваемых цепей к ним.

Исследования структур с МР показали, что после отказов части компонентов на концах резервируемых проводников будет важен порядок переключения [12]. Так, в случае отказа, моделируемого либо коротким замыканием (КЗ), либо обрывом (ХХ) на одном из концов резервируемой цепи, после переключения на резервную цепь максимальная амплитуда выходного напряжения ($U_{\max}$) изменяется.

Разработаны и исследованы способы трехкратного МР [13]. При этом считалось, что структура симметрична по вертикальной оси,

т. е. ширины проводников, как и расстояния между проводниками, равны между собой. Однако варианты асимметричной компоновки проводников для этой структуры с МР рассмотрены не были. Цель работы – рассмотреть структуры с различными вариантами асимметрии, при которых удастся достичь лучших характеристик до и после отказов части компонентов, чем в симметричном варианте.

Материалы и методы. Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC [14, 15] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Структура с трехкратным МР представляет собой четырехпроводную линию передачи (ЛП) с боковой и лицевой связями. Опорные проводники выполнены в виде отдельных слоев сверху и снизу. Считается, что структура в поперечном сечении зеркально-симметрична (рис. 1). Она обладает следующими параметрами: ширина проводников (П1–П4) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w = 200$ мкм; толщина проводников $t = 35$ мкм; расстояния между проводниками $s_1 = s_2 = s = 200$ мкм; диэлектрическая проницаемость внутреннего слоя $\epsilon_r = 10.2$; диэлектрическая проницаемость внешнего слоя $\epsilon_{r1} = 4.3$; толщина слоя диэлектрика $h = 254$ мкм; расстояние между сигнальными и опорным проводниками $h_2 = 530$ мкм; длина структуры $l = 1$ м. Выбор длины в 1 м обусловлен необходимостью модального разложения воздействующего импульса за счет соответствия условию

$$t_{\Sigma} < l \min |\tau_{i+1} - \tau_i|, \quad i = 1, \dots, N - 1,$$

где t_{Σ} – общая длительность импульса; l – длина отрезка; i – номер моды; τ_i – погонная задержка i -й моды; N – количество проводников в структуре. При несоблюдении этого условия происходит наложение импульсов, что увеличивает $U_{\max}$.

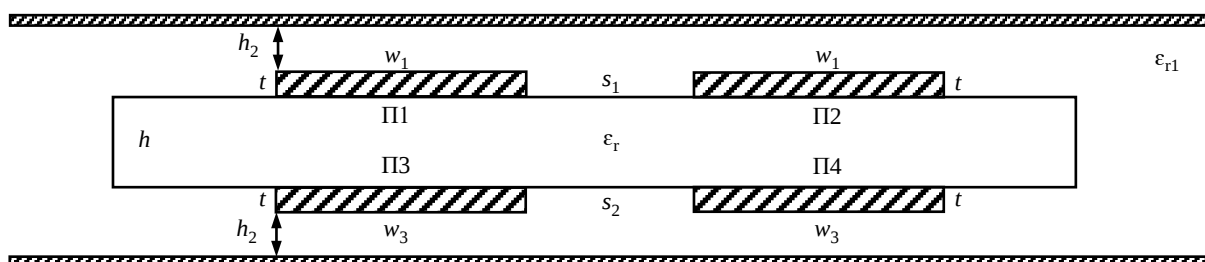


Рис. 1. Поперечное сечение выбранной структуры с трехкратным МР

Fig. 1. Cross section of the selected structure with triple modal reservation

На рис. 2 представлены эквивалентные схемы выбранной структуры с трехкратным МР до (рис. 2, а) и после (рис. 2, б) первого отказа. Параметры источника воздействия: форма импульса – трапецевидная; время нарастания, спада и плоской вершины – 10 пс; общая длительность импульса – 30 пс; амплитуда электродвижущей силы (ЭДС) – 2 В. Значения нагрузок R_1 – R_8 до отказов взяты равными 50 Ом. При отказе активной линии и переключении на П2 нагрузки R_1 , R_5 на концах ЛП рассматривались в вариантах 50-XX и 50-КЗ. КЗ задавалось значением нагрузки 10^{-6} Ом, а XX – 10^6 Ом.

Вычислены временные отклики структуры с трехкратным МР. Форма напряжения на ближнем конце (рис. 3) показывает псевдосогласование с трактом 50 Ом, что следует из равенства амплитуды напряжения половине ЭДС воздействия. Форма напряжения на дальнем конце (рис. 4) показывает 4 импульса разложения. Минимальная разность задержек ($\Delta\tau_{\min}$) равна 434.11 пс, тогда как максимальная разность за-

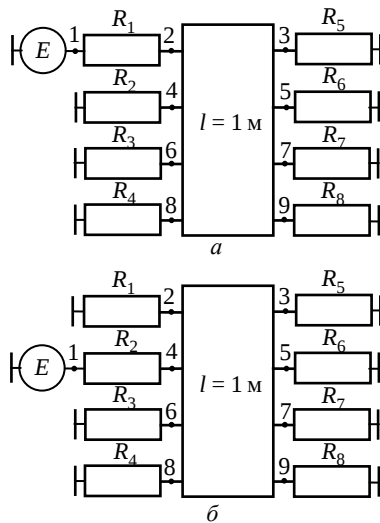


Рис. 2. Эквивалентные схемы выбранной структуры с трехкратным МР до (а) и после (б) первого отказа

Fig. 2. Equivalent circuits of the selected structure before (a) and after (b) first failure

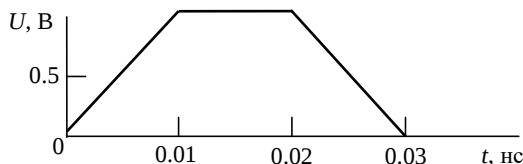


Рис. 3. Форма напряжения на ближнем конце структуры с трехкратным МР

Fig. 3. Voltage waveforms at the near end of a triple MR structure

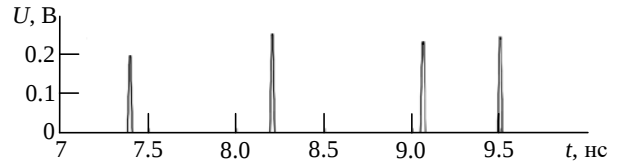


Рис. 4. Форма напряжения на дальнем конце структуры с трехкратным МР

Fig. 4. Voltage waveforms at the far end of a triple MR structure

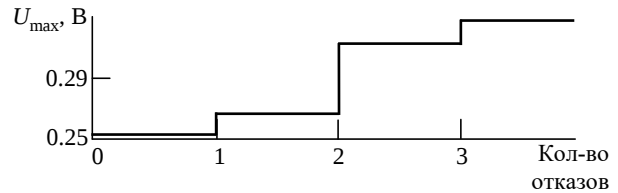


Рис. 5. Зависимости $U_{\max}$ от номера отказа структуры с трехкратным МР

Fig. 5. Dependencies of $U_{\max}$ on the failure number of a structure with a triple MR

держек ($\Delta\tau_{\max}$), которая определяется разницей задержек между первым и последним импульсами (и являющейся общим временем разложения импульса воздействия), равна 2107.97 пс, при этом $U_{\max} = 0.252$ В. На рис. 5 представлены зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для выбранной структуры с трехкратным МР. Для нее $U_{\max}$ достигают 0.252, 0.265, 0.309 и 0.325 В до и после отказов 1, 2 и 3 соответственно.

Результаты. Здесь исследуется неодинаковость каналов передачи структуры с трехкратным МР, показанной ранее (рис. 1), введением асимметрии в поперечном сечении. Поиск оптимальных параметров проводился с помощью многовариантного анализа в диапазонах параметров, выбранных из практических соображений (минимум в 100 мкм выбран из-за ограничения производственных норм для ПП, а максимум в 1000 мкм – для ограничения числа вариантов перебора) по двум критериям: минимизация $U_{\max}$ и выравнивание амплитуд импульсов. Первый можно описать как

$$\max(U(t)) \rightarrow \min,$$

где $\max(U(t))$ – максимальная амплитуда выходного напряжения, а второй –

$$\sum \left[(U_i - U_j)^2 \right] \rightarrow \min;$$

$$i, j \in \{1, 2, 3, 4\}; i \neq j,$$

где i и j – индексы; U_i и U_j – максимальные амплитуды i -го и j -го импульсов.

Изменение h_2 минимально изменяет $U_{\max}$ на дальнем конце, однако значительно влияет на амплитуду на ближнем конце ($U_{6,к}$). Поэтому для каждого набора параметров, представленных на графиках зависимостей далее, значение h_2 выбиралось для лучшего согласования с трактом 50 Ом в диапазоне от 100 до 5000 мкм за счет достижения близкого к половине ЭДС воздействия $U_{6,к}$. Были рассмотрены следующие варианты компоновок:

- 1) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$, а w изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 2) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4$, $s_1 \neq s_2$, а w изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 3) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$, рассматривались два варианта: $w_3 = w_4 = 200$ мкм в первом и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_1 = w_2$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 4) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$, рассматривались два варианта: $w_1 = w_2 = 200$ мкм в первом и $w_1 = w_2 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_3 = w_4$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 5) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 \neq s_2$, рассматривались два варианта: $w_3 = w_4 = 200$ мкм в первом и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_1 = w_2$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 6) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 \neq s_2$, рассматривались два варианта: $w_1 = w_2 = 200$ мкм в первом и $w_1 = w_2 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_3 = w_4$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 7) $w_2 = w_4 \neq w_1 = w_3$, $s_1 = s_2$, рассматрива-

лись два варианта: $w_2 = w_4 = 200$ мкм в первом и $w_2 = w_4 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_1 = w_3$ изменялись от 100 до 1000 мкм;

8) $w_2 = w_4 \neq w_1 = w_3$, $s_1 = s_2$, рассматривались два варианта: $w_1 = w_3 = 200$ мкм в первом и $w_1 = w_3 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_2 = w_4$ изменялись от 100 до 1000 мкм.

На рис. 6 приведены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1, w_2, w_3 и w_4 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм, а на рис. 7 – при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 564 пс/м (рис. 6, а) и 107 пс/м (рис. 7, а). Первый график зависимости амплитуд (рис. 6, б) показывает примерное выравнивание U_2, U_3 и U_4 при $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 100$ мкм и $U_{\max} = 0.25$ В. На втором графике амплитуд (рис. 7, б) показано выравнивание U_3 и U_4 при изменении w в диапазоне 400...600 мкм, однако при $w = 400$ мкм максимально сближаются U_1 и U_2 при $U_{\max} = 0.23$ В. Таким образом, определены наборы 1 и 2.

На рис. 8 приведены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1, w_2, w_3 и w_4 при $s_1 = 200$ мкм, $s_2 = 1000$ мкм, а на рис. 9 – при $s_1 = 1000$ мкм, $s_2 = 200$ мкм.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 227 пс/м (рис. 8, а) и 175 пс/м (рис. 9, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 8, б) есть 4 набора параметров, при которых достигается выравнивание, как минимум, двух импульсов, а именно: $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w = 200$ мкм (набор 1, где $U_1 = U_3$) с $U_{\max} = 0.37$ В, $w = 300$ мкм (набор 2,

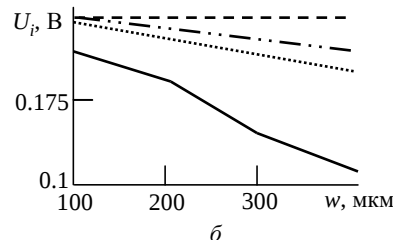
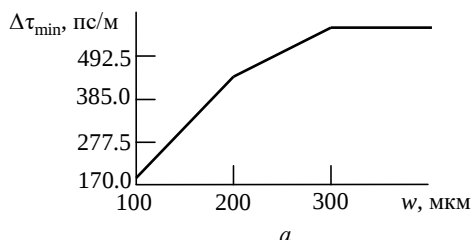


Рис. 6. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1, w_2, w_3 и w_4 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм

Fig. 6. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots-)$ (б) on simultaneously changing w_1, w_2, w_3 and w_4 with $s_1 = s_2 = 200$ μm

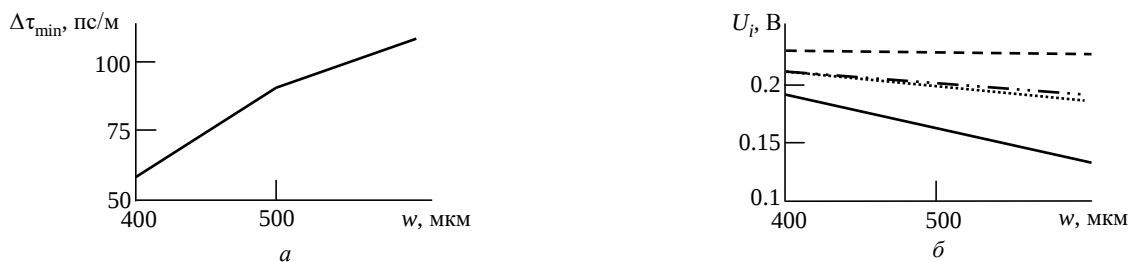


Рис. 7. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 , w_2 , w_3 и w_4 при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм

Fig. 7. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots-)$ (б) on simultaneously changing w_1 , w_2 , w_3 and w_4 with $s_1 = s_2 = 1000$ μm



Рис. 8. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 , w_2 , w_3 и w_4 при $s_1 = 200$ мкм и $s_2 = 1000$ мкм

Fig. 8. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots-)$ (б) on simultaneously changing w_1 , w_2 , w_3 and w_4 with $s_1 = 200$ μm and $s_2 = 1000$ μm

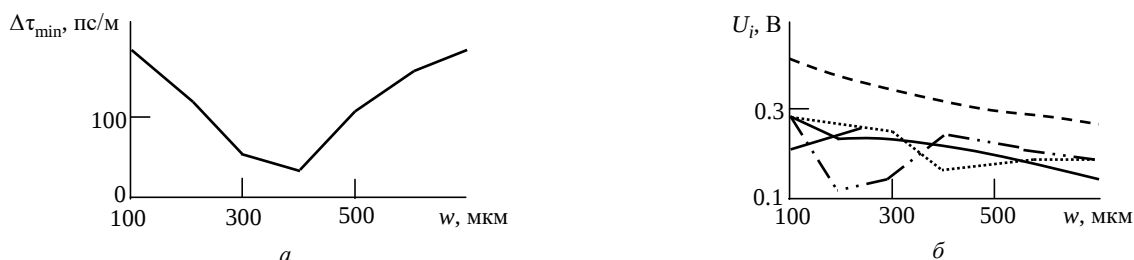


Рис. 9. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 , w_2 , w_3 и w_4 при $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 9. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots-)$ (б) on simultaneously changing w_1 , w_2 , w_3 and w_4 with $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

где $U_3 = U_4$) с $U_{\max} = 0.56$ В, $w = 400$ мкм (набор 3, где $U_1 = U_2$) с $U_{\max} = 0.28$ В и $w = 500$ мкм (набор 4, где $U_2 \approx U_3 \approx U_4$) с $U_{\max} = 0.244$ В. На втором графике зависимости амплитуд (рис. 9, б) видны 2 набора параметров, при $w = 100$ мкм и $w \approx 340$ мкм, однако при моделировании второго набора происходит наложение импульсов, а разность задержек $\Delta\tau_{\min} < 30$ пс. Из-за этого использовать данный набор некорректно, так как выравненная амплитуда соответствует амплитуде одного наложенного импульса. Поэтому по данным графикам выделены наборы 3–7.

На рис. 10–13 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при фиксированных значениях $w_3 = w_4$ и $s_1 = s_2$.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 575 пс/м (рис. 10, а), 504 пс/м (рис. 11, а), 94 пс/м (рис. 12, а) и 98 пс/м (рис. 13, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 10, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 200$ мкм, $s_1 = s_2 = 200$ мкм с $U_{\max} = 0.252$ В. На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 11, б) представлено 2 набора параметров при $w_1 = w_2 = 200$ мкм с $U_{\max} = 0.325$ В и $w_1 = w_2 = 400$ мкм с $U_{\max} = 0.24$ В.

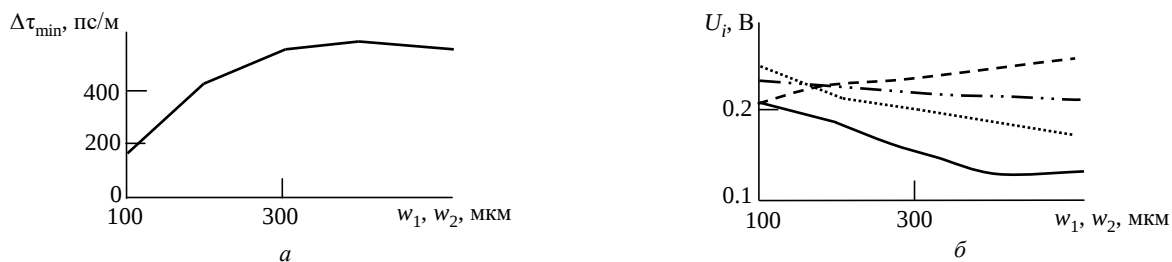


Рис. 10. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм и $w_3 = w_4 = 200$ мкм

Fig. 10. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 200$ μm and $w_3 = w_4 = 200$ μm

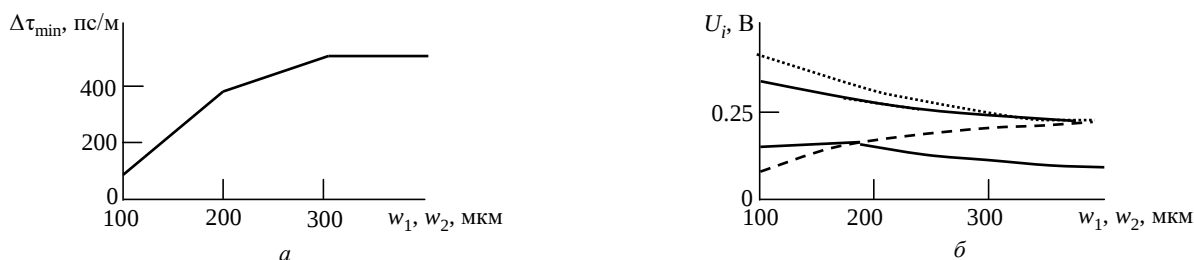


Рис. 11. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм

Fig. 11. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 200$ μm and $w_3 = w_4 = 1000$ μm

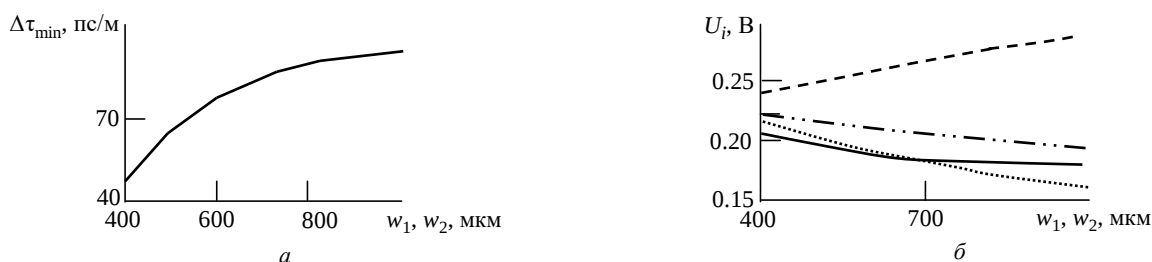


Рис. 12. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм и $w_3 = w_4 = 200$ мкм

Fig. 12. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 1000$ μm and $w_3 = w_4 = 200$ μm

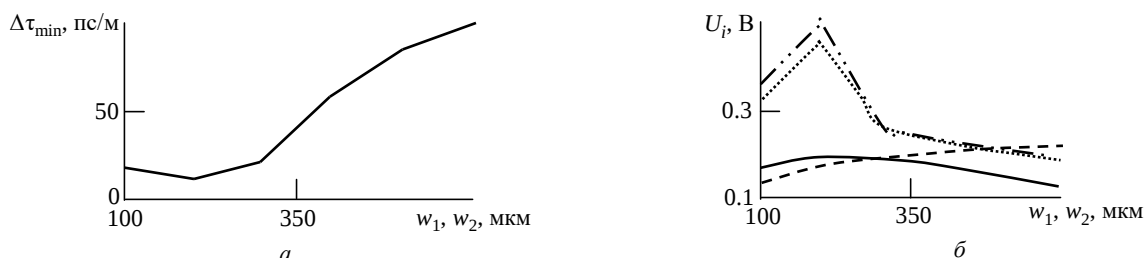


Рис. 13. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм

Fig. 13. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 1000$ μm and $w_3 = w_4 = 1000$ μm

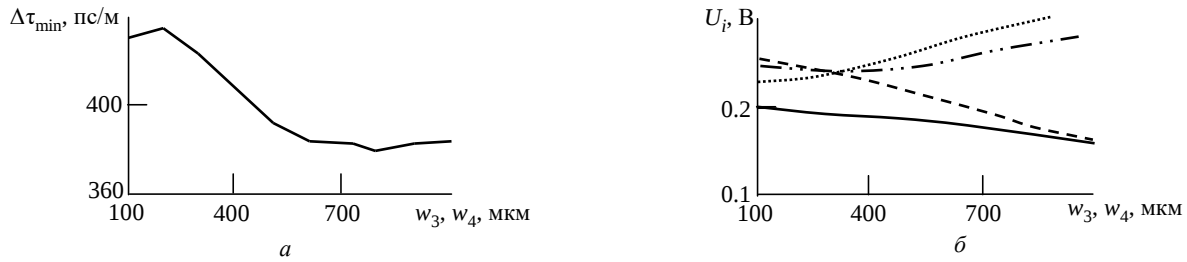


Рис. 14. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 200$ мкм и $s_1 = s_2 = 200$ мкм

Fig. 14. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 200$ μm and $s_1 = s_2 = 200$ μm

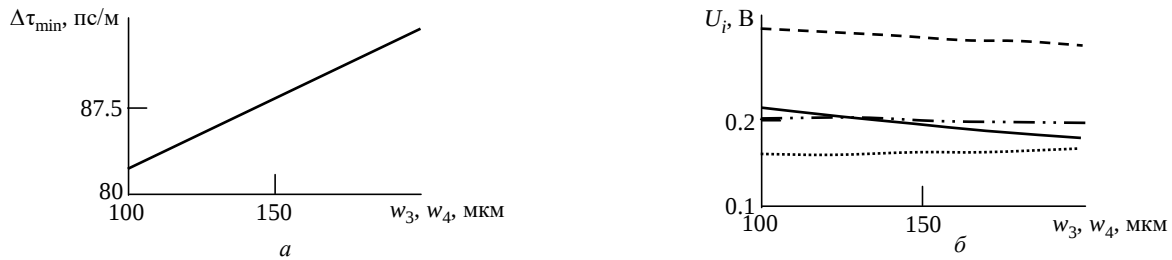


Рис. 15. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 1000$ мкм и $s_1 = s_2 = 1000$ мкм

Fig. 15. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 1000$ μm and $s_1 = s_2 = 1000$ μm

На третьем графике зависимостей амплитуд (рис. 12, б) не представлено наборов параметров. На четвертом графике зависимостей амплитуд (рис. 13, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 500$ мкм с $U_{\max} = 0.214$ В. Таким образом, обнаружены наборы 8–11.

На рис. 14 и 15 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при фиксированных значениях w_1 , w_2 и s_1 , s_2 .

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 434 пс/м (рис. 14, а) и 94 пс/м (рис. 15, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 14, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 400$ мкм

с $U_{\max} = 0.25$ В. На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 15, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 140$ мкм с $U_{\max} = 0.3$ В. Таким образом, определены наборы 12 и 13.

На рис. 16–19 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при фиксированных значениях w_3 , w_4 и s_1 , s_2 , а также при $s_1 \neq s_2$.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 236 пс/м (рис. 16, а), 163 пс/м (рис. 17, а), 245 пс/м (рис. 18, а) и 168 пс/м (рис. 19, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 16, б) представлены 2 набора параметров: при

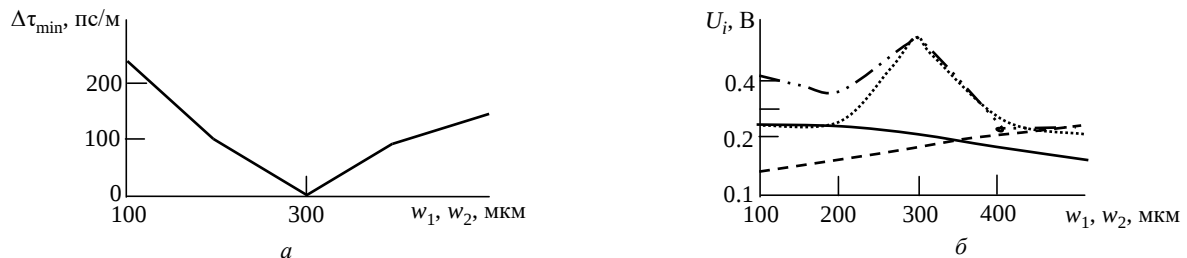


Рис. 16. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 200$ мкм и $s_1 = 200$ мкм и $s_2 = 1000$ мкм

Fig. 16. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 200$ μm and $s_1 = 200$ μm and $s_2 = 1000$ μm

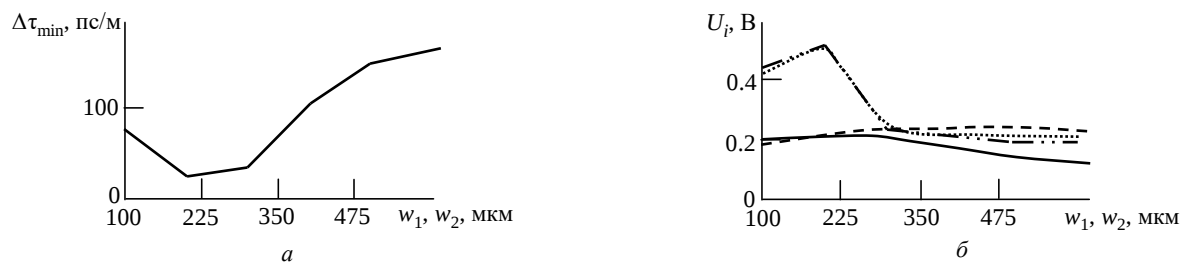


Рис. 17. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$ и $U_4(-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 1000$ мкм и $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 17. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$, $U_4(-)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 1000$ μm and $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

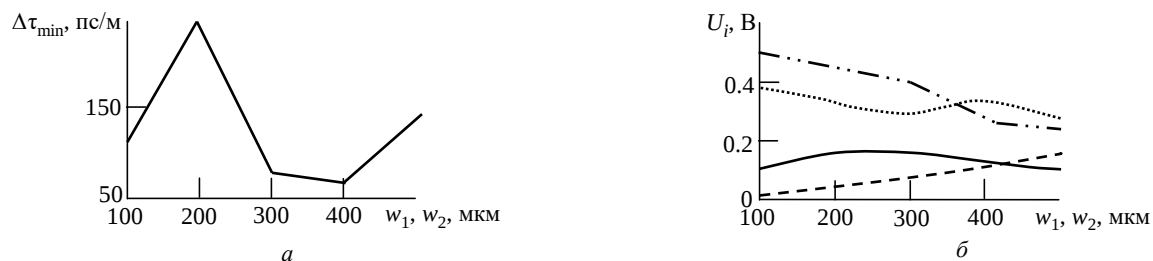


Рис. 18. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$ и $U_4(-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 1000$ мкм и $s_1 = 200$ мкм и $s_2 = 1000$ мкм

Fig. 18. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$, $U_4(-)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 1000$ μm and $s_1 = 200$ μm and $s_2 = 1000$ μm

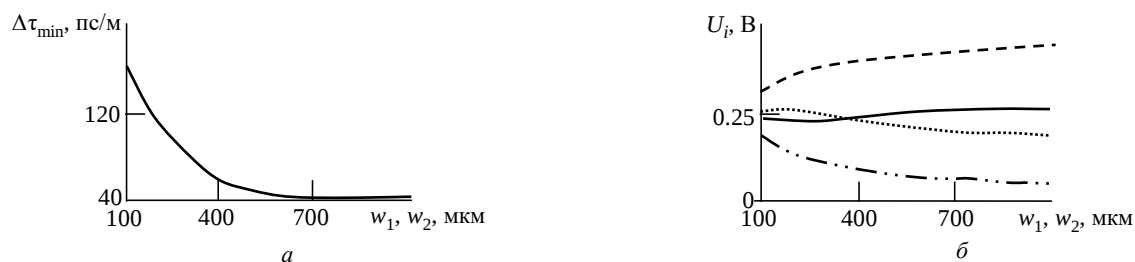


Рис. 19. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$ и $U_4(-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 200$ мкм и $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 19. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$, $U_4(-)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 200$ μm and $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

$w_1 = w_2 = 200$ мкм (аналогичный набору 3 и поэтому не представленный отдельно) и $w_1 = w_2 = 500$ мкм с $U_{\max} = 0.23$ В. На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 17, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 300$ мкм с $U_{\max} = 0.235$ В. На третьем графике зависимостей амплитуд (рис. 18, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 400$ мкм с $U_{\max} = 0.35$ В. На четвертом графике зависимостей амплитуд (рис. 19, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 340$ мкм, однако при моделировании амплитуды равны при $w_1 = w_2 = 390$ мкм с $U_{\max} = 0.4$ В. Таким образом, определены наборы 14–16.

На рис. 20–22 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_3 , w_4 при фиксированных значениях w_1 , w_2 и s_1 , s_2 . При этом $s_1 \neq s_2$.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 250 пс/м (рис. 20, а), 132.5 пс/м (рис. 21, а) и 101 пс/м (рис. 22, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 20, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 200$ мкм (аналогичный набору 3). На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 21, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 300$ мкм с $U_{\max} = 0.42$ В. На третьем графике зависимостей амплитуд (рис. 22, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 =$

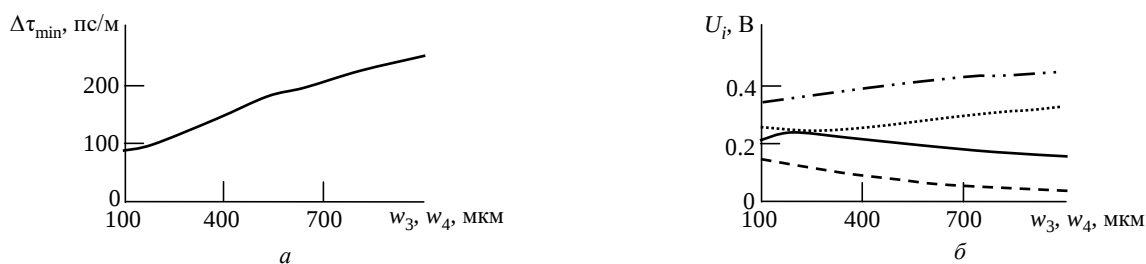


Рис. 20. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 200$ мкм и $s_1 = 200$ мкм и $s_2 = 1000$ мкм

Fig. 20. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 200$ μm and $s_1 = 200$ μm and $s_2 = 1000$ μm

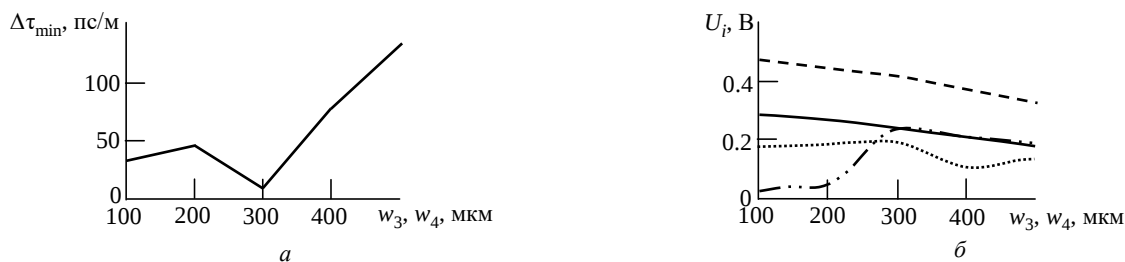


Рис. 21. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 1000$ мкм и $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 21. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 1000$ μm and $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

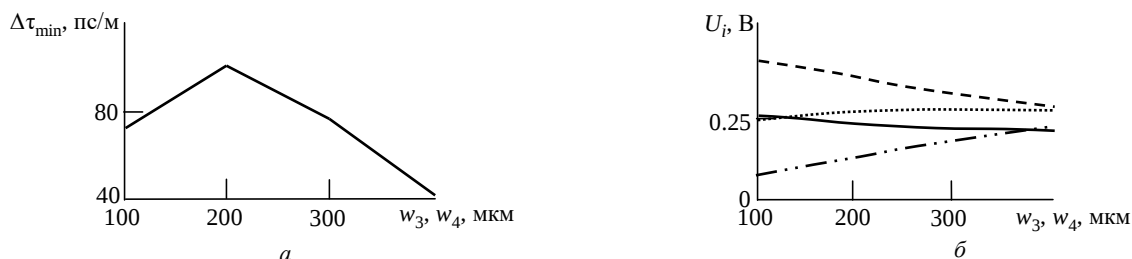


Рис. 22. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 200$ мкм и $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 22. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 200$ μm and $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

= 400 мкм с $U_{\max} = 0.28$ В. Таким образом, определены наборы 17 и 18.

В табл. 1 приведены наборы параметров, полученные ранее, а также их значения $U_{\max}$, $U_{6,k}$ и $\Delta\tau_{\min}$. На рис. 23 представлены формы

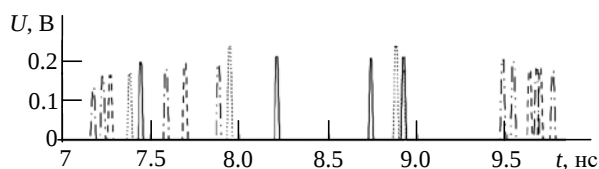


Рис. 23. Формы напряжения на дальнем конце структуры с наборами параметров 1 (—), 2 (---), 11 (---), 15 (---) и 18 (---) из табл. 1

Fig. 23. Voltage waveforms at the far end of the structure with parameter sets 1 (—), 2 (---), 11 (---), 15 (---), 18 (---) from Tab. 1

напряжения на дальнем конце структуры при наилучших определенных наборах параметров (1, 2, 11, 15, 18). На рис. 24 представлены поперечные сечения исследуемых компоновок структуры с трехкратным МР. В табл. 2 представлены значения $U_{\max}$ каждого из наборов параметров до и после отказов. На рис. 25 приведены зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для каждого набора параметров. На рис. 26 представлены зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для наборов с наименьшими амплитудами: рис. 26, а – наилучшие наборы от каждого графика на рис. 25, а рис. 26, б – среди всех наборов. Значения $U_{\max}$ для номера отказа от 0 до 1 соответствуют значениям до отказов (табл. 1).

Табл. 1. Наборы параметров

Tab. 1. Sets of parameters

Компоновка	Набор	w_1 , мкм	w_2 , мкм	w_3 , мкм	w_4 , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	h_2 , мкм	$\Delta\tau_{\min}$, пс/м	$U_{\max}$, В	$U_{\text{б.к.}}$, В
$w_1 = w_2 = w_3 = w_4, s_1 = s_2$	1	100	100	100	100	200	200	180	182.74	0.252	1.0027
	2	400	400	400	400	1000	1000	1250	57.277	0.229	0.9994
$w_1 = w_2 = w_3 = w_4, s_1 \neq s_2$	3	200	200	200	200	200	1000	350	99.921	0.369	1.0004
	4	300	300	300	300	200	1000	730	1.8424	0.56	1.001
	5	400	400	400	400	200	1000	1830	90.671	0.28	1.0001
	6	500	500	500	500	200	1000	5000	142.96	0.244	0.9874
	7	100	100	100	100	1000	200	140	173.39	0.429	1.0051
$w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4, s_1 = s_2$	8	200	200	200	200	200	200	530	434.11	0.252	1.00053
	9	400	400	1000	1000	200	200	5000	503.9	0.236	0.976
	10	300	300	200	200	1000	1000	650	23.554	0.241	1.00414
	11	500	500	1000	1000	1000	1000	2580	82.363	0.214	1.00003
	12	200	200	400	400	200	200	560	406.53	0.248	1.0007
	13	1000	1000	140	140	1000	1000	4600	92.006	0.298	1.00646
$w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4, s_1 \neq s_2$	14	500	500	200	200	200	1000	5000	139.44	0.231	0.992
	15	300	300	1000	1000	1000	200	800	34.071	0.235	1
	16	390	390	200	200	1000	200	620	46.867	0.399	1.00959
$w_2 = w_4 \neq w_1 = w_3, s_1 = s_2$	17	1000	1000	300	300	1000	200	2390	8.153	0.417	0.99998
	18	200	200	400	400	1000	200	310	43.008	0.284	1.00098

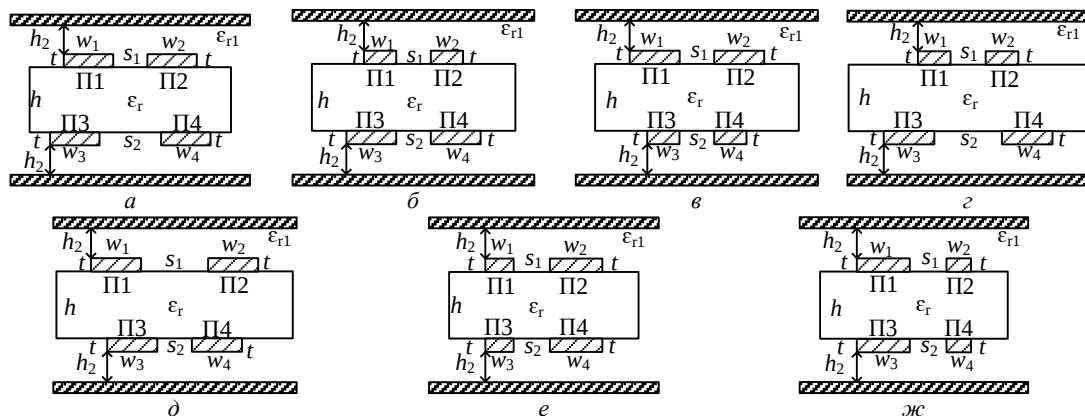


Рис. 24. Поперечные сечения исследуемых вариантов компоновки 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е) и 7 (ж) структуры с трехкратным МР

Fig. 24. Cross sections of the studied layout options 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж) structure with triple MR

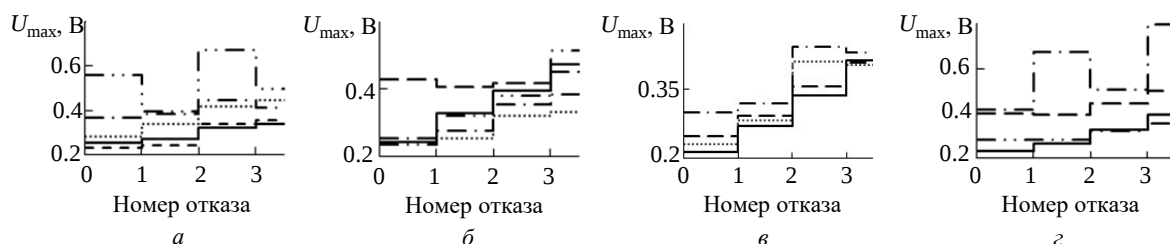


Рис. 25. Зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для наборов параметров 1 (—), 2 (---), 3 (---), 4 (---), 5 (---) (а); 6 (—), 7 (---), 8 (---), 9 (---), 10 (---) (б); 11 (—), 12 (---), 13 (---), 14 (---) (в); 15 (—), 16 (---), 17 (---), 18 (---) (г)

Fig. 25. Dependencies of $U_{\max}$ on the failure number for parameter sets 1 (—), 2 (---), 3 (---), 4 (---), 5 (---) (a); 6 (—), 7 (---), 8 (---), 9 (---), 10 (---) (б); 11 (—), 12 (---), 13 (---), 14 (---) (в); 15 (—), 16 (---), 17 (---), 18 (---) (г)

Видно, что из рассмотренных наборов наименьшим значением $U_{\max}$ до отказов обладает набор 11. Однако после отказов из всех рассмотренных наборов не было обнаружено тех, что обладали бы лучшими амплитудными

характеристиками по сравнению с симметричными вариантами. Между тем есть асимметричный набор параметров, обладающий сопоставимыми характеристиками по сравнению с ними. Набор 10 до и после первого отказа об-

Табл. 2. Значения напряжений наборов до ($U_{\max}$), после первого ($U_{\max1}$), второго ($U_{\max2}$) и третьего ($U_{\max3}$) отказов у определенных наборов параметров структур с трехкратным МР

Tab. 2. Values of voltage sets before ($U_{\max}$), after the first ($U_{\max1}$), second ($U_{\max2}$) and third ($U_{\max3}$) failures for certain sets of parameters of structures with triple MR

Набор	$U_{\max}$, В	$U_{\max1}$, В	$U_{\max2}$, В	$U_{\max3}$, В
1	0.252	0.268	0.32	0.341
2	0.229	0.241	0.336	0.353
3	0.369	0.382	0.445	0.414
4	0.56	0.395	0.671	0.494
5	0.28	0.339	0.415	0.443
6	0.244	0.329	0.394	0.473
7	0.429	0.407	0.42	0.451
8	0.252	0.276	0.353	0.385
9	0.236	0.321	0.381	0.516
10	0.241	0.255	0.322	0.334
11	0.214	0.269	0.335	0.412
12	0.248	0.291	0.354	0.406
13	0.298	0.318	0.442	0.428
14	0.231	0.282	0.41	0.402
15	0.235	0.264	0.328	0.397
16	0.399	0.395	0.443	0.501
17	0.417	0.672	0.508	0.796
18	0.284	0.282	0.324	0.358

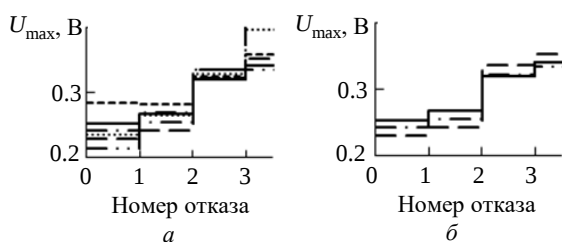


Рис. 26. Зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для лучших наборов параметров 1 (—), 2 (---), 10 (---), 11 (---), 15 (---), 18 (---) (а) и 1 (—), 2 (---), 10 (---) (б)

Fig. 26. Dependencies of $U_{\max}$ on the failure number for the best sets of parameters 1 (—), 2 (---), 10 (---), 11 (---), 15 (---), 18 (---) (a) and 1 (—), 2 (---), 10 (---) (b)

ладает значением $U_{\max}$, которое находится между значениями при наборах 1 и 2. После отказа 2 набор 10 обладает сопоставимой амплитудой с набором 1, а после отказа 3 амплитуда данного набора становится меньше, чем

при симметричных вариантах. Между тем данный набор имеет недостаток – минимальная разница погонных задержек $\Delta\tau_{\min} = 24$ пс/м, что меньше общей длительности импульса 30 пс. Из-за этого импульсы накладываются. Стоит также отметить наборы 8, 9 и 12. Они не улучшают амплитудных характеристик, но увеличивают $\Delta\tau_{\min}$ в 2.38, 2.75 и 2.22 раза по сравнению с набором 1.

Заключение. Таким образом, проанализированы асимметричные варианты компоновок ПП с трехкратным МР с целью выявления полезных эффектов во временной области. Определены 18 наборов параметров, при которых выравниваются амплитуды как минимум двух из четырех импульсов. Не обнаружено наборов параметров, дающих большее ослабление помехового импульса после отказов активной линии по сравнению с симметричными наборами (1 и 2). Однако обнаружен набор (10), обладающий сопоставимыми с симметричными наборами (1 и 2) характеристиками, но с $\Delta\tau_{\min} < 30$ пс, что ведет к наложению амплитуд импульсов. Помимо этого обнаружено, что при использовании некоторых вариантов асимметричной компоновки (8, 9 и 12) $\Delta\tau_{\min}$ больше в 2.38, 2.75 и 2.22 раза соответственно, чем при наборе 1 (значение $\Delta\tau_{\min}$ которого больше, чем при симметричном наборе 2). Это означает, что компоновку $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$ возможно использовать для уменьшения вероятности наложения импульсов на реальном устройстве или длины линии, по сравнению с симметричным вариантом, без риска наложения импульсов. Полученные данные можно использовать как рекомендации при трассировке макетов ПП, когда необходимо увеличить разность задержек.

В ходе дальнейших исследований планируется провести экспериментальные измерения макетов ПП, созданных по результатам моделирования.

Список литературы

1. IEC 61508-1:2010 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems – P. 1: General requirements (see Functional Safety and IEC 61508). URL: <https://webstore.iec.ch/publication/5515> (дата обращения 10.04.24).
2. Patel M. R. Spacecraft Power Systems. Boca Raton: CRC Press, 2005. 736 p. doi: 10.1201/9781420038217
3. Денисенко В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2008. № 2. С. 90–99. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/369991.pdf> (дата обращения 12.04.2024).
4. Monolithic MEMS T-type switch for redundancy switch matrix applications / K. Y. Chan, M. Daneshmand, A. A. Fomani, R. R. Mansour, R. Ramer // 38th European

Microwave Conf., Amsterdam, Netherlands, 27–31 Oct. 2008. IEEE, 2008. P. 1513–1516.

doi: 10.1109/EUMC.2008.4751755

5. Techniques and Measures to Achieve EMI Resilience in Mission- or Safety-Critical Systems / D. Pissort, J. Lannoo, J. Van Waes, A. Degraeve, J. Boydens // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6, iss. 4. P. 107–114.

doi: 10.1109/MEMC.0.8272297.

6. Degraeve A., Pissort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination // Asia-Pacific Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Shenzhen, China, 17–21 May 2016. IEEE, 2016. P. 211–213.

doi: 10.1109/APEMC.2016.7523012.

7. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144.

doi: 10.24411/2410-9916-2019-10307

8. Khazhibekov R., Zabolotsky A. M. Modal filter with interdigital structure of conductors for 100 Mbit/s Ethernet equipment protection // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2019), Tomsk, Russia, 18–20 Apr. 2019. IEEE, 2019. P. 1–4.

doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729577

9. Бевзенко И. Г., Заболоцкий А. М. Модальная фильтрация как средство защиты от сверхкоротких импульсов // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2007. № 1. С. 258–260.

10. Zhechev Y. S. Signal integrity analysis for the four-layer reflection symmetric modal filter // J. of Radio Electronics. 2022. № 8. P. 1–16.

doi: 10.30898/1684-1719.2022.8.5

11. Зима Е., Газизов Р. Р. Модальное резервирование: современное состояние // Докл. ТУСУР. 2024. Т. 27, № 3. С. 55–69.

doi: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69

12. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / A. O. Belousov, A. V. Medvedev, E. B. Chernikova, T. R. Gazizov, A. M. Zabolotsky // Symmetry. 2021. Vol. 13, iss. 6. Art. № 1074. P. 1–22.

doi: 10.3390/sym13061074

13. Медведев А. В. Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 175–203.

doi: 10.24412/2410-9916-2023-2-175-203

14. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng. 2019. Vol. 560. Art. № 012110. P. 1–7.

doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012110

15. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С. П. Куксенко, Т. Р. Газизов, А. А. Квасников, А. В. Демаков, А. А. Иванов, Д. В. Ключин, А. Алхадж Хасан, А. Е. Максимов, А. В. Осинцев // Наноиндустрия. 2023. Т. 16, № S9–1 (119). С. 170–178.

doi: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.170.178

Информация об авторах

Морозов Сергей Романович – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2024, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники), аспирант кафедры телевидения и управления, инженер научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; устройства защиты; модальная фильтрация; модальное резервирование.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: pred11072@yandex.ru; sergei.r.morozov@tusur.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2351-9819>

Газизов Тальгат Рашитович – доктор технических наук (2010); профессор (2023), заведующий кафедрой телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 550 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; устройства защиты; модальная фильтрация; модальное резервирование.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>

References

1. IEC 61508-1:2010 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems – P. 1: General requirements (see Functional

Safety and IEC 61508). Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/5515> (accessed 10.04.24).

2. Patel M. R. *Spacecraft Power Systems*. Boca Raton, CRC Press, 2005, 736 p.
doi: 10.1201/9781420038217
3. Denisenko V. V. *Hardware Redundancy in Industrial Automation. Part 1. Modern Automation Technologies*. 2008, no. 2, pp. 90–99. (In Russ.).
Available at: <https://www.cta.ru/cms/f/369991.pdf> (accessed 12.04.2024)
4. Chan K. Y., Daneshmand M., Fomani A. A., Mansour R. R., Ramer R. *Monolithic MEMS T-Type Switch for Redundancy Switch Matrix Applications*. 38th European Microwave Conf., Amsterdam, Netherlands, 27–31 Oct. 2008. IEEE, 2008, pp. 1513–1516.
doi: 10.1109/EUMC.2008.4751755
5. Pissort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. *Techniques and Measures to Achieve EMI Resilience in Mission- or Safety-Critical Systems*. IEEE Electromagnetic Compability Magazine. 2017, vol. 6, iss. 4, pp. 107–114.
doi: 10.1109/MEMC.0.8272297.
6. Degraeve A., Pissort D. *Study of the Effectiveness of Spatially EM-Diverse Redundant Systems Under Plane-Wave Illumination*. Asia-Pacific Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Shenzhen, China, 17–21 May 2016. IEEE, 2016, pp. 211–213.
doi: 10.1109/APEMC.2016.7523012
7. Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R. *Analysis of Reservation Methods Based on Modal Filtration*. Systems of Control, Communication and Security. 2019, no. 3, pp. 117–144. (In Russ.)
doi: 10.24411/2410-9916-2019-10307
8. Khazhibekov R., Zabolotsky A. M. *Modal Filter with Interdigital Structure of Conductors for 100 Mbit/s Ethernet Equipment Protection*. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2019), Tomsk, Russia, 18–20 Apr. 2019. IEEE, 2019, pp. 1–4.
doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729577
9. Bevzenko I. G., Zabolotsky A. M. *Modal Filtering as a Means of Protection Against Ultrashort Pulses*. Electronic Means and Control Systems: Proc. Reports of the Intern. Scientific and Practical Conf. 2007, vol. 1, pp. 258–260.
10. Zhechev Y. S. *Signal Integrity Analysis for the Four-Layer Reflection Symmetric Modal Filter*. J. of Radio Electronics. 2022, no. 8, pp. 1–16.
doi: 10.30898/1684-1719.2022.8.5
11. Zima E., Gazizov R. R. *Modal Reservation: Current State*. Proc. of TUSUR University. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 55–69. (In Russ.)
doi: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69
12. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. *Switching Order After Failures in Symmetric Protective Electrical Circuits with Triple Modal Reservation*. Symmetry. 2021, vol. 13, iss. 6, art. no. 1074, pp. 1–22.
doi: 10.3390/sym13061074
13. Medvedev A. V. *Simulating, Evaluating, and Selecting the Optimum Switching Order for Circuits with Triple Modal Reservation after Failures along the Conductors*. Systems of Control, Communication and Security. 2023, no. 2, pp. 175–203. (In Russ.)
doi: 10.24412/2410-9916-2023-2-175-203
14. Kuksenko S. P. *Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation*. IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng. 2019, vol. 560, art. no. 012110, pp. 1–7.
doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012110
15. Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Kvasnikov A. A., Demakov A. V., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Alhadege Hasan A., Maksimov A. Ye., Osintsev A. V. *Developing Software for Modeling Radioelectronic Equipment with Respect to Electromagnetic Compatibility in TUSUR*. Nanoindustry. 2023, vol. 16, no. S9-1(119), pp. 170–178. (In Russ.)
doi: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.170.178

Information about the authors

Sergey R. Morozov, Master in Infocommunication technologies and communication systems (2024, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Postgraduate student of the Department of Television and Control, Engineer of Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility of Department of Television and Control in Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 11 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; protection devices; modal filtering; modal reservation. Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk 634050, Russia
E-mail: pred11072@yandex.ru; sergei.r.morozov@tusur.ru
<https://orcid.org/0009-0006-2351-9819>

Talgat R. Gazizov, Dr Sci. (Eng.) (2010), Professor (2023), Head of the Department of Television and Control of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 550 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; protection devices; modal filtering; modal reservation. Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk 634050, Russia
E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>

Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра и их применение в антенных решетках проходного типа

А. В. Станковский[✉], С. В. Поленга, Е. А. Стригова,
А. Д. Немшон, Е. Р. Гафаров, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[✉] stankovskiy_a@mail.ru

Аннотация

Введение. Представлена процедура синтеза фазокорректирующих элементов (ФКЭ) на основе полосового фильтра с помощью специально разработанного программного обеспечения (ПО). Проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик синтезированных ФКЭ и LC-фильтров на сосредоточенных элементах. Полученные структуры могут быть применены в отклоняющих и фокусирующих антенных решетках (АР) проходного типа и в низкопрофильных сканирующих антенных системах (АС) наземных терминалов спутниковых систем связи. Это особенно актуально в условиях активного развития спутниковой связи, особенно при использовании средне- и низкоорбитальных космических аппаратов.

Цель работы. Разработка ПО для синтеза ФКЭ на основе полосового фильтра и последующее их применение в отклоняющих и фокусирующих АР проходного типа.

Материалы и методы. Для расчета характеристик фильтров использовались программы MATLAB, Filter Solutions и AWR DE. Характеристики ФКЭ получены при помощи электродинамического моделирования методом конечных элементов и методом конечного интегрирования.

Результаты. Произведены расчеты полосовых LC-фильтров по заданным характеристикам: центральная частота – 10 ГГц; полоса пропускания – 40 %; неравномерность в полосе пропускания – 0.1 дБ. Разработано ПО для синтеза ФКЭ на основе фильтров Чебышева 1-го типа четного и нечетного порядков с 3-го по 9-й. Получено хорошее совпадение характеристик фильтра на связанных резонаторах и ФКЭ. Синтезированы отклоняющая и фокусирующая структуры и проведено их электродинамическое моделирование. Угол наклона диаграммы направленности отклоняющей структуры составил 20°. Коэффициент отражения фокусирующей структуры в диапазоне 10.7...12.7 ГГц не превысил –15 дБ. Коэффициент направленного действия изменялся от 25.8 до 28 дБ.

Заключение. Разработанное ПО позволяет синтезировать резонаторные фильтры и ФКЭ различных порядков по заданным характеристикам. ПО позволяет в значительной степени сократить время, затрачиваемое на расчет и синтез большого количества ФКЭ. Синтезированные отклоняющие и фокусирующие структуры могут быть использованы как самостоятельно, так и в качестве управляющих слоев в низкопрофильных сканирующих АС.

Ключевые слова: полосовой фильтр, фазокорректирующий элемент, периодическая структура, пространственный фильтр, фильтр Чебышева

Для цитирования: Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра и их применение в антенных решетках проходного типа / А. В. Станковский, С. В. Поленга, Е. А. Стригова, А. Д. Немшон, Е. Р. Гафаров, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 20–32.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-20-32

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Статья поступила в редакцию 14.08.2024; принята к публикации после рецензирования 14.10.2024; опубликована онлайн 30.04.2025

Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter and Their Application in Transmitarray Antenna

Andrey V. Stankovsky✉, Stanislav V. Polenga, Yelena A. Strigova,
Andrey D. Nemshon, Evgeniy R. Gafarov, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ stankovskiy_a@mail.ru

Abstract

Introduction. This paper presents a procedure for synthesis of phase-correcting elements (PCE) based on band-pass filter using specialized software developed for these purposes. The amplitude response of the synthesized PCE and LC-filters based on lumped elements is compared. The obtained structures can be applied in deflecting and focusing transmitarrays and in low-profile scanning antenna systems of ground terminals of satellite communication systems, which is particularly significant for the advancement of satellite communications used by medium- and low-orbit spacecrafts.

Aim. Software development for PCE synthesis based on band-pass filters (BPF) for application in deflecting and focusing transmitarrays.

Materials and methods. The filter characteristics were calculated using the MATLAB, Filter Solutions, and AWR DE software applications. Characteristics of the synthesized PCE were obtained by electrodynamic modeling using the finite element and finite integration methods.

Results. BPF were calculated in different software applications according to the given characteristics: center frequency – 10 GHz; bandwidth – 40%; and irregularity in the bandwidth – 0.1 dB. A software environment for synthesis of PCE was developed based on Chebyshev filters of type 1 of even and odd orders from 3 to 9. A satisfactory match between the characteristics of the coupled resonator filter and PCE was obtained. The deflecting and focusing structures were synthesized, and their electrodynamic modeling was carried out. The slope angle of the radiation pattern of the deflecting structure was 20°. The reflection coefficient of the focusing structure ranged within 10.7...12.7 GHz, not exceeding –15 dB. The directivity coefficient varied from 25.8 to 28 dB.

Conclusion. The synthesized deflecting and focusing structures can be used both independently and as control layers in low-profile scanning antenna systems. The developed software provides a significant reduction in the time required for the calculation and synthesis of a large number of PCE.

Keywords: band-pass filter, phase-correcting element, periodic structure, spatial filter, Chebyshev filter

For citation: Stankovsky A. V., Polenga S. V., Strigova Ye. A., Nemshon A. D., Gafarov E. R., Salomatov Yu. P. Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter and Their Application in Transmitarray Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 20–32.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-20-32

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The study was carried out as part of the state task of the Siberian Federal University (number FSRZ-2023-0008).

Submitted 14.08.2024; accepted 14.10.2024; published online 30.04.2025

Введение. Антенны с механоэлектрическим сканированием, работающие на принципе квазиоптического управления диаграммой направленности (ДН), позволяют изменять положение максимума вращением двух идентичных отклоняющих слоев [1], профиль антенны при этом не изменяется. Каждый из слоев вносит линейный фазовый набег, а результирующий

наклон фазового фронта зависит от взаимного положения упомянутых слоев. Одной из наиболее простых реализаций отклоняющей структуры являются диэлектрические клинья, которые были исследованы и описаны в [2, 3]. К основным недостаткам таких структур можно отнести большие габариты и потери в диэлектрике. Диаграммообразующая схема с

синфазным распределением и отклоняющие структуры располагаются параллельно поверхности земли. Толщиной структур в этом случае можно пренебречь. Сканирование в угломестной плоскости обеспечивается поворотом отклоняющих слоев вокруг оси антенны на одинаковый угол в противоположных направлениях. Поворот слоев в одном направлении обеспечивает сканирование по азимуту.

К наиболее распространенным на сегодняшний день структурам, управляющим лучом ДН, относятся линзовые структуры и антенные решетки (АР) проходного типа в виде частотно-селективных поверхностей (ЧСП). Подобные структуры активно исследуются, разрабатываются и применяются учеными во всем мире [4–7]. В таких решетках ЧСП выступает в роли пространственного фильтра [8–11] и состоит из набора фазокорректирующих элементов (ФКЭ) [12–14]. Каждый отдельный элемент АР рассчитывается и настраивается таким образом, чтобы обеспечить пропускание в рабочей полосе частот и при этом внести необходимую фазовую задержку. Это позволяет управлять фазовым фронтом волны и реализовывать на основе ФКЭ отклоняющую и фокусирующую структуры. Для уменьшения профиля сканирующей антенны упомянутые структуры могут быть объединены в один слой.

Результаты исследований. Топология и эквивалентная схема. В представленной статье ФКЭ является пространственным фильтром, который рассчитывается на основе эквивалентного полосно-пропускающего фильтра (ППФ) на связанных резонаторах, переход к которому подробно описан в [15, 16]. Модель ФКЭ показана на рис. 1 и представляет собой набор квадратных диэлектрических подложек с размером сторон D , чередующихся металлических

пластин с размерами $(D - s)$, образующих емкостные слои, и линий с размерами w , образующих индуктивные слои. Толщина подложки равна h , индексы α и β указывают на расположение подложки относительно индуктивного слоя (α – выше, β – ниже). Индексы i, j зависят от порядка фильтра и принимают следующие значения: $i = 1, 2, \dots, N, j = i + 1$, но не больше N . Подложки из диэлектрического материала также являются индуктивными слоями (вносимой емкостью пренебрегают ввиду ее малого значения). Количество слоев представленной топологии определяется порядком N эквивалентного ППФ. Общая толщина структуры зависит от порядка фильтра и составляет приблизительно $(N - 1)\lambda_0/30$, что много меньше, чем у аналогичной диэлектрической линзы. Размер D подложки ФКЭ составляет $0.1 \dots 0.2 \lambda_0$.

Синтез фильтров в различных программах.

Синтез ФКЭ происходит в 2 этапа: сначала вычисляются номиналы эквивалентного ППФ на связанных резонаторах, а затем эти значения пересчитываются в размеры самого ФКЭ. Для реализации программного обеспечения (ПО), позволяющего синтезировать ФКЭ, использовалась программа MATLAB. С помощью встроенных функций в ней можно рассчитать математическую модель фильтра на классической схеме, получить матрицы нулей (z) и полюсов (p) и вычислить его передаточную характеристику:

$$H(s) = \frac{z(s)}{p(s)},$$

где s – комплексная переменная.

Для расчета номиналов элементов фильтра с заданными характеристиками можно, например, воспользоваться программой Filter Solutions. Однако пользоваться дополнительным ПО при

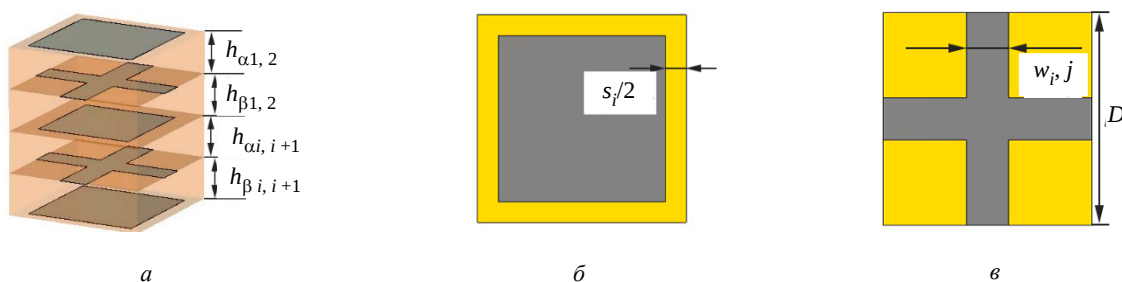


Рис. 1. Топология ФКЭ на основе ППФ 3-го порядка: а – 3D-модель; б – емкостный слой; в – индуктивный слой

Fig. 1. Topology of the PCE based on the 3rd order BPF: а – 3D-model; б – capacitive layer; в – inductive layer

Табл. 1. Преобразование ФНЧ в ППФ

Tab. 1. Converting a low-pass filter to a band-pass filter

Элемент ФНЧ	Элемент ППФ

синтезе ФКЭ не очень удобно. В связи с этим в MATLAB также необходимо реализовать расчет номиналов элементов фильтров.

Полосовой фильтр. Для расчета полосового фильтра, реализованного по классической схеме, обычно используют низкочастотный (НЧ) фильтр-прототип, номиналы емкости (C) и индуктивности (L) которого выбираются в соответствии с типом фильтра. Для получения ППФ с двумя полосами заграждения из фильтра нижних частот (ФНЧ) с одной полосой заграждения выполняют частотное преобразование [17] по следующим формулам:

$$s = \frac{p^2 + \omega_0^2}{Bp};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_B \omega_H}, \text{ если } \frac{\omega_B}{\omega_H} \leq 1.05;$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_B \omega_H}{\left(\omega_B + \omega_H - \sqrt{(\omega_H - \omega_B)^2 + \omega_B \omega_H} \right)},$$

если $\frac{\omega_B}{\omega_H} > 1.05,$

где p – комплексная частотная переменная; B – ширина полосы пропускания в рад/с; ω_0 – центральная частота; ω_B и ω_H – верхняя и нижняя граничные частоты.

Элементы преобразуются согласно схемам, приведенным в табл. 1. Классическая схема полосового фильтра представлена на рис. 2.

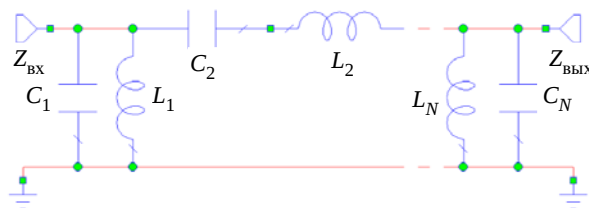


Рис. 2. Полосовой фильтр

Fig. 2. Band-pass filter

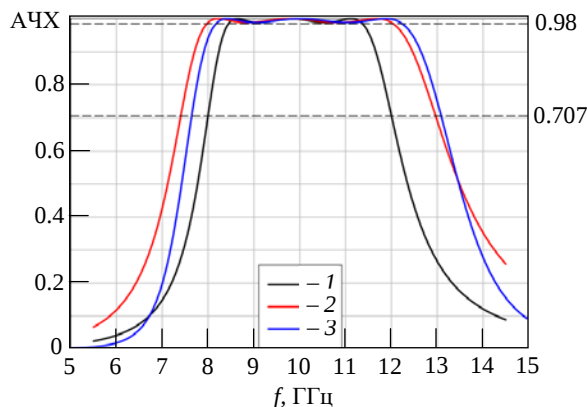


Рис. 3. АЧХ фильтров Чебышева 3-го порядка

Fig. 3. Amplitude response of the 3rd order Chebyshev filter

Передаточная функция для такой схемы записывается в следующем виде:

$$K(p) = \frac{2U_{ВЫХ}(p)}{U_{ВХ}(p)} \sqrt{\frac{Z_{ВХ}}{Z_{ВЫХ}}},$$

где $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ – входное и выходное напряжения; $Z_{ВХ}$ и $Z_{ВЫХ}$ – соответствующие сопротивления.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные для трех полосовых фильтров Чебышева 1-го типа 3-го порядка со следующими параметрами: центральная частота – 10 ГГц, полоса пропускания – 40 %.

Графикам на рис. 3 соответствуют следующие фильтры: 1 – синтезированный на основе НЧ-прототипа; 2 – рассчитанный с помощью встроенных функций MATLAB; 3 – синтезированный в программе Filter Solutions. В используемых программах (MATLAB и Filter Solutions) полоса пропускания задается параметром B . Неравномерность АЧХ (A) в этой полосе не превышает установленного порогового значения, а превышение определяет частоту среза синтезируемого фильтра. При синтезе ППФ на основе НЧ-прототипа частота среза задается по уровню 0.707, что и дает меньшую полосу пропускания

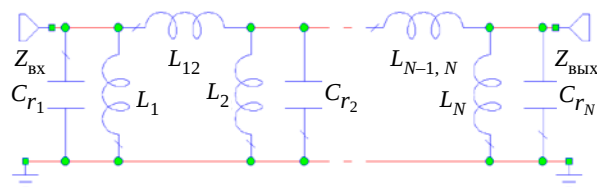


Рис. 4. Схема фильтра на связанных резонаторах

Fig. 4. Filter on coupled resonators

(BW). Это следует учитывать при проектировании фильтров и реализации ПО.

Фильтры на связанных резонаторах. Эквивалентная схема ФКЭ, полученная в [18], представляет собой резонаторный полосовой фильтр на сосредоточенных элементах (рис. 4). Как следует из названия, он состоит из нескольких резонаторов (количество зависит от порядка фильтра), соединенных индуктивной либо емкостной связью [19].

Особенность расчета фильтра на связанных резонаторах в том, что номиналы элементов крайних резонаторных контуров (1-го и N-го) подлежат расчету по следующим формулам:

$$L_1 = \frac{L_{12}L_{r_1}}{L_{12} - L_{r_1}}; \quad L_N = \frac{L_{N-1, N}L_{r_N}}{L_{N-1, N} - L_{r_N}};$$

$$C_{r_1} = \frac{\alpha_1 R_{ВХ}}{(\omega_B - \omega_H)Z_0}; \quad C_{r_N} = \frac{\alpha_N R_{ВЫХ}}{(\omega_B - \omega_H)Z_0},$$

где $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$ и α – табличные нормированные значения ФНЧ-прототипа [17], которые выступают в качестве входных данных в реализуемом ПО; Z_0 – входное и выходное сопротивления фильтра на сосредоточенных элементах. Для пространственного фильтра $Z_0 = 377$ Ом (волновое сопротивление свободного пространства). Для расчета номинальных значений индуктивностей или емкостей внутренних резонаторных контуров необходимо задать их с некоторыми ограничивающими условиями. Для емкостей эти условия представлены выражениями:

$$C_{r_2} < \frac{\alpha_1 \alpha_2 C_{r_1}}{\delta^2};$$

$$C_{r_{N-1}} < \frac{\alpha_N \alpha_{N-1} C_{r_N}}{\delta^2},$$

$$C_{r_{N-1}} > \delta^2 \times$$

$$\times \left[\frac{1}{\sqrt{\alpha_{N-2} \alpha_{N-1}}} \sqrt{C_{r_{N-2}}} + \frac{1}{\sqrt{\alpha_{N-1} \alpha_N}} \sqrt{C_{r_N}} \right]^2;$$

$$C_{r_i} < \left[\frac{\sqrt{\alpha_{i-1} \alpha_i} \left(\sqrt{C_{r_{i-1}}} - \frac{1}{\sqrt{\alpha_{i-2} \alpha_{i-1}}} \sqrt{C_{r_{i-2}}} \right)}{\delta} \right]^2,$$

$$i = 3, 4, \dots, N-2;$$

$$\delta = \frac{\omega_B - \omega_H}{\omega_0}.$$

После этого номиналы индуктивностей рассчитываются из следующего соотношения:

$$L_{r_k} C_{r_k} = \frac{1}{\omega_0^2}, \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Подобным образом определяются и номиналы емкостей при заданных номиналах индуктивностей. Такие условия, в том числе, позволяют в дальнейшем ограничить суммарную площадь емкостных патчей, так как она должна быть меньше площади подложки. В противном случае в ЧСП может образоваться полностью металлический слой без зазоров, что приведет к полному отражению волны.

С точки зрения синтеза фильтров, необходимость задавать номиналы элементов усложняет процесс. На практике же это упрощает настройку фильтров, позволяет подобрать элементы из номинального ряда, а при расчете ФКЭ получить более удобные их размеры w , s и h .

Преобразования между схемами с П-образным и Т-образным соединениями элементов осуществляются по известным формулам [17, 19].

Номиналы оставшихся индуктивностей вычисляются по формулам

$$\frac{1}{L_k} = \frac{1}{L_{r_k}} - \frac{1}{L_{k-1, k}} - \frac{1}{L_{k, k+1}},$$

$$k = 2, 3, \dots, N-1;$$

$$L_{12} = \sqrt{\frac{\alpha_2 L_{r_2} Z_0}{(\omega_B - \omega_H) R_{ВХ}}};$$

$$L_{k, k+1} = \frac{\omega_0}{\omega_B - \omega_H} \sqrt{\alpha_k \alpha_{k+1} L_{r_k} L_{r_{k+1}}},$$

$$k = 2, 3, \dots, N-2,$$

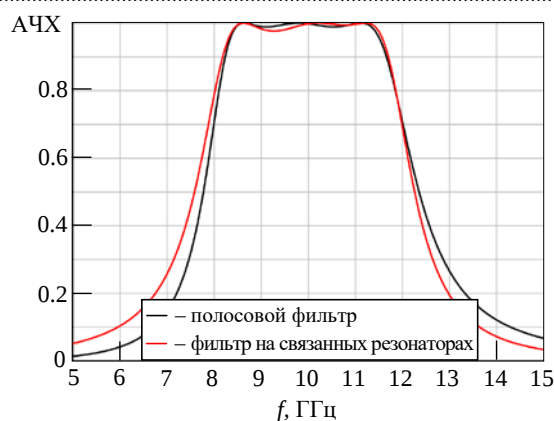


Рис. 5. АЧХ полосового фильтра и фильтра на связанных резонаторах

Fig. 5. Amplitude responses of band-pass filter and filter on coupled resonators

$$L_{N-1, N} = \sqrt{\frac{\alpha_{N-1} L_{r_{N-1}} Z_0}{(\omega_B - \omega_H) R_{\text{ВЫХ}}}}.$$

На рис. 5 приведены АЧХ полосового фильтра Чебышева и рассчитанного на его основе резонаторного фильтра. Как видно, представленные характеристики имеют хорошее совпадение в области полосы пропускания 8...12 ГГц.

Синтез и моделирование ФКЭ. Как отмеча-

лось ранее, ПО для синтеза ФКЭ разработано в среде MATLAB. Рабочее окно программы показано на рис. 6.

Получив все необходимые исходные данные, программа рассчитывает резонаторный фильтр, его АЧХ и фазочастотную характеристику (ФЧХ), которые отображаются справа. Значения емкостей внутренних резонаторов $C_2 \dots C_{N-1}$ вводятся в дополнительные диалоговые окна. Учитывая электрическую и магнитную постоянные (ϵ_0 , μ_0), а также эффективные диэлектрическую и магнитную проницаемости выбранного материала подложки (ϵ_{ef} , μ_{ef}), программа пересчитывает синтезированный резонаторный фильтр в размеры ФКЭ по следующим формулам:

$$s_i = \frac{2D \arcsin \left[\exp \left(-\frac{\pi C_i}{2D\epsilon_0\epsilon_{\text{ef}}} \right) \right]}{\pi};$$

$$w_{i,j} = \frac{2D \arcsin \left[\exp \left(-\frac{2\pi L_{i,j}}{D\mu_0\mu_{\text{ef}}} \right) \right]}{\pi};$$

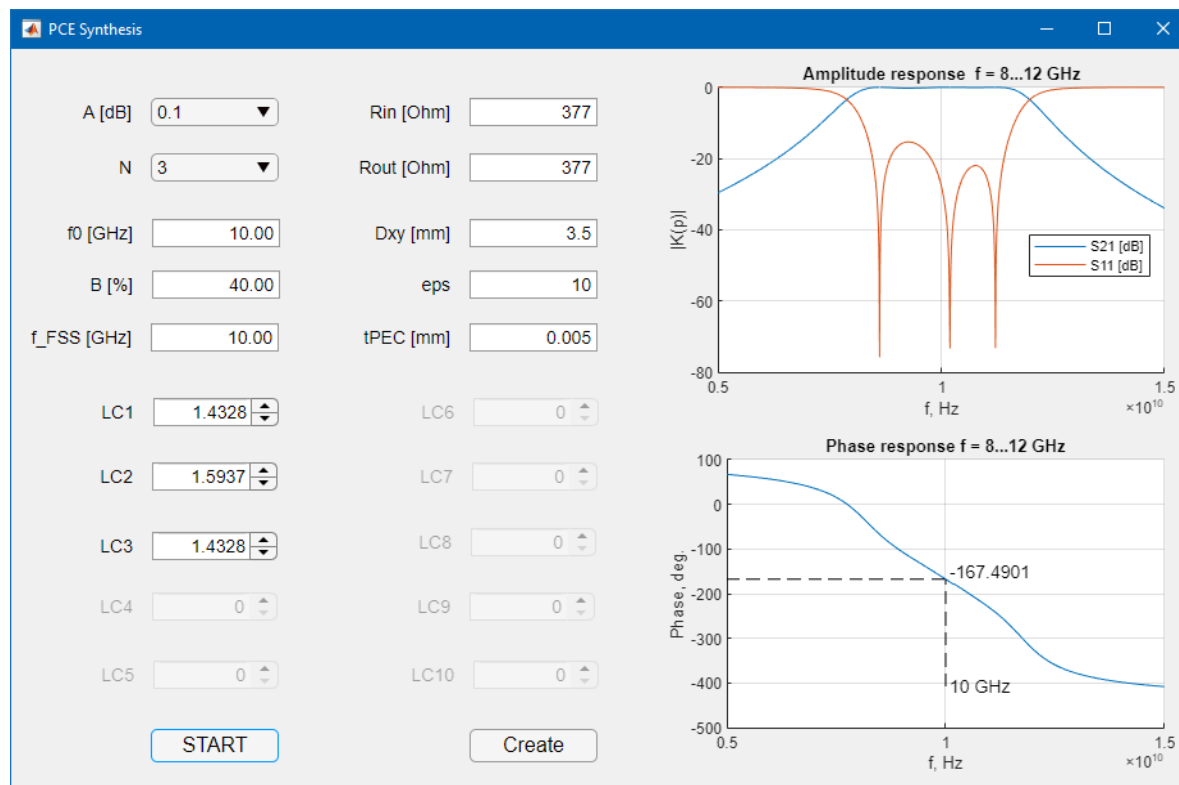


Рис. 6. Окно программы

Fig. 6. Software window

Табл. 2. Номиналы элементов фильтров и размеры элементов ЧСП

Tab. 2. Nominal values of filter elements and dimensions of frequency selective surface elements

Полосовой фильтр	Резонаторный фильтр	ЧСП 1	ЧСП 2
$C_1 = C_3 = 0.1512$ пФ	$C_1 = C_3 = 0.1512$ пФ	$s_1 = s_3 = 0.714$ мм	$s_1 = s_3 = 0.813$ мм
$C_2 = 0.011$ пФ	$C_2 = 0.2158$ пФ	$s_2 = 0.219$ мм	$s_2 = 0.624$ мм
$L_1 = L_3 = 1801.2$ пГн	$L_1 = L_4 = 1053.1$ пГн	$w_{12} = w_{23} = 1.084$ мм	$w_{12} = w_{23} = 0.797$ мм
$L_2 = 23906$ пГн	$L_2 = L_3 = 1801.2$ пГн	$ha_{12} = h\beta_{23} = 1.059$ мм	$ha_{12} = h\beta_{23} = 1.052$ мм
	$L_{12} = L_{23} = 809.93$ пГн	$ha_{23} = h\beta_{12} = 0.473$ мм	$ha_{23} = h\beta_{12} = 0.797$ мм

$$h_{\alpha(\beta)\{i, i+1\}} = \frac{L_{\alpha(\beta)\{i, i+1\}}}{\mu_0 \mu_{ef} \alpha(\beta)\{i, i+1\}}.$$

Для электродинамического моделирования несколько идентичных ФКЭ можно объединить, образуя пространственный фильтр в виде ЧСП. В табл. 2 приведены номиналы элементов фильтров и размеры элементов ЧСП ($f_0 = 10$ ГГц; $BW = 40\%$; $A = 0.1$ дБ). Стоит отметить, что характеристики пространственного фильтра на ЧСП 1 значительно отличаются от характеристик фильтров на сосредоточенных элементах (рис. 7 и 8). В связи с этим в формулы были введены поправочные коэффициенты и получен фильтр ЧСП 2.

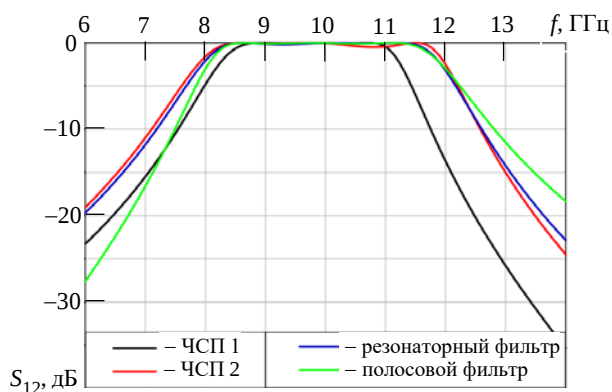


Рис. 7. Коэффициент передачи различных фильтров

Fig. 7. Transmission coefficients of the filters versus frequency

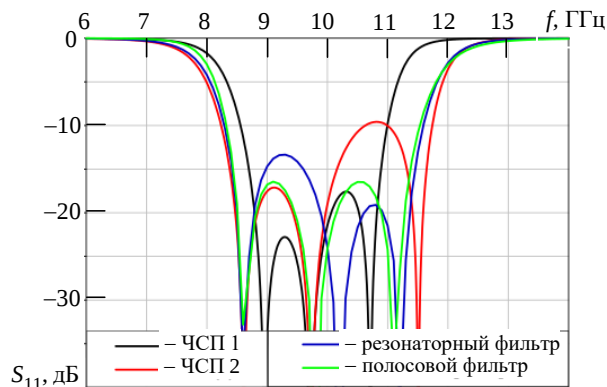


Рис. 8. Коэффициент отражения различных фильтров

Fig. 8. Reflection coefficients of the filters versus frequency

Размеры D ФКЭ для обеих структур были выбраны равными 3.5 мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 10$, сопротивление $Z_0 = 377$ Ом.

Результаты электродинамического моделирования в виде графиков коэффициентов передачи (S_{12}) и отражения (S_{11}) двух пространственных фильтров приведены на рис. 7 и 8. Для сравнения представлены эти же характеристики двух фильтров на сосредоточенных элементах, из которых и были получены ФКЭ.

Стоит отметить, что характеристики фильтров на сосредоточенных элементах, полученные с помощью реализуемого ПО, совпадают с аналогичными характеристиками таких фильтров, рассчитанными в других программах, что свидетельствует о корректной работе разработанного ПО в этой части.

Моделирование проходных АР. С помощью представленной программы можно синтезировать проходную АР. На ФЧХ элемента влияет центральная частота, на которую рассчитан резонаторный фильтр. При этом каждому ФКЭ будет соответствовать своя смещенная по частоте АЧХ. Полоса пропускания проходной АР в виде ЧСП должна располагаться в рабочем диапазоне частот (например, 10.7...12.7 ГГц для Ку-диапазона). Для этого АЧХ всех ФКЭ при их совмещении должны давать необходимое окно прозрачности, что достигается выбором широкой полосы пропускания (например, 60 %) синтезируемых фильтров. При этом регулировка фазы в Ку-диапазоне должна составлять 360° .

На рис. 9 приведены графики зависимостей фазы коэффициента передачи семи ФКЭ. Характер ФЧХ в диапазоне 10.7...12.7 ГГц близок к линейному и позволяет обеспечить необходимую регулировку задержки фазы прошедшей волны различными ФКЭ. Наклон кривых увеличивается с уменьшением центральной рабочей частоты.

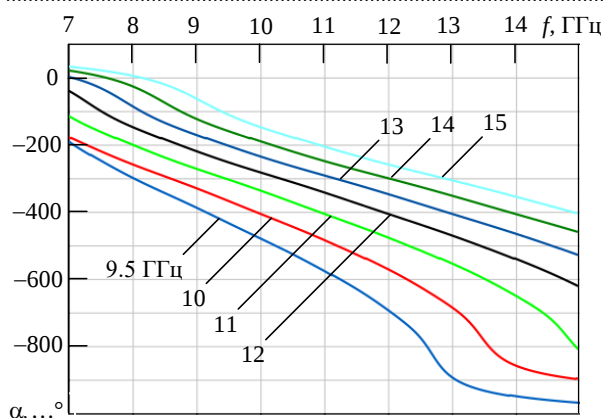


Рис. 9. Зависимость фазы коэффициента передачи от частоты для различных фазокорректирующих элементов

Fig. 9. Frequency dependence of the transmission coefficient phase for different phase-correcting elements

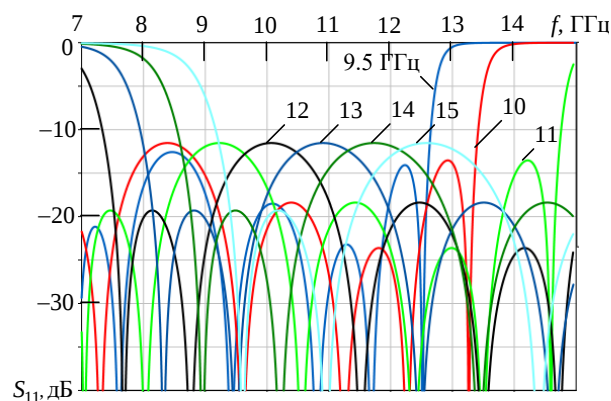


Рис. 10. Коэффициенты отражения фазокорректирующих элементов

Fig. 10. Reflection coefficients of phase-correction elements

На рис. 10 приведены графики зависимостей коэффициентов отражения от частоты семи ФКЭ.

Центральная частота синтезируемых фильтров была выбрана с учетом указанных выше требований. Видно, что при совмещении ФКЭ имеют широкую полосу рабочих частот 37 % (8.7...12.7 ГГц), а в диапазоне 10.7...12.7 ГГц уровень S_{11} не превышает -12 дБ.

Таким образом, с помощью представленного ПО можно синтезировать ФКЭ с требуемыми АЧХ и ФЧХ. Далее по полученным размерам создаются электродинамические модели ФКЭ, характеристики которых рассчитываются при помощи САПР. Топология аналогична показанной на рис. 1, но имеет большее количество слоев. При необходимости производится дополнительная настройка и оптимизация размеров ФКЭ.

Полученные характеристики свидетельствуют о том, что предлагаемая структура пригодна для реализации широкополосных низкопрофильных проходных АР. Проходную структуру на основе пространственных фильтров можно реализовать как в виде фокусирующей линзы, так и в виде отклоняющей системы. Синтез отклоняющей ЧСП, состоящей из ФКЭ, осуществляется по принципу дискретного изменения фазовой задержки в соседних элементах и с учетом принципа зонирования (рис. 11).

Для модели ЧСП, показанной на рис. 11, при синтезе ФКЭ был выбран фильтр 6-го порядка, $D = 6$ мм. В качестве подложки для всех элементов использовали материал толщиной 1 мм и $\epsilon = 2.4$, что позволило реализовать каждый слой ЧСП в одном технологическом процессе. Общая тол-

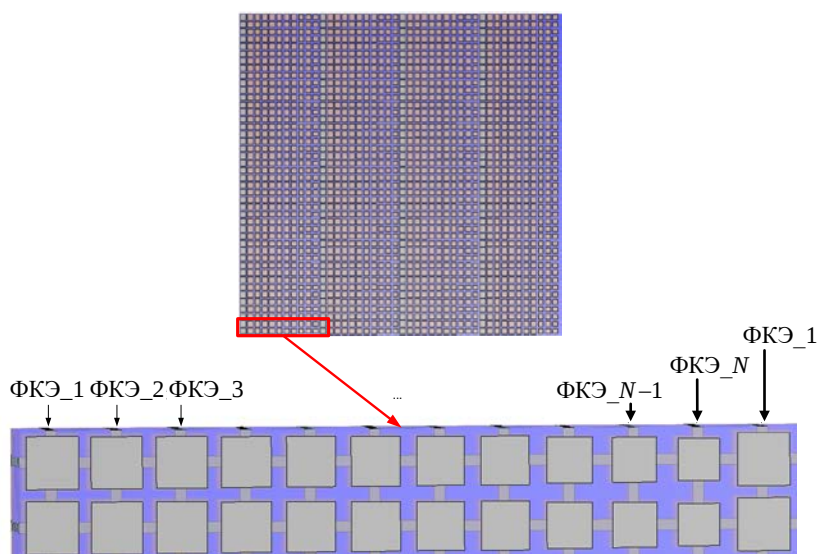


Рис. 11. Модель отклоняющей ЧСП

Fig. 11. Model of a deflecting frequency selective surface

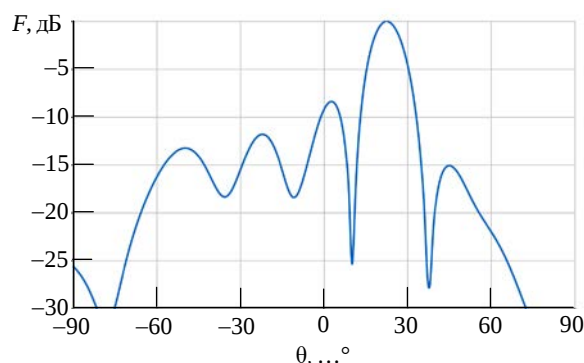


Рис. 12. Отклонение ДН с помощью ЧСП

Fig. 12. Radiation pattern deflection using a frequency selective surface

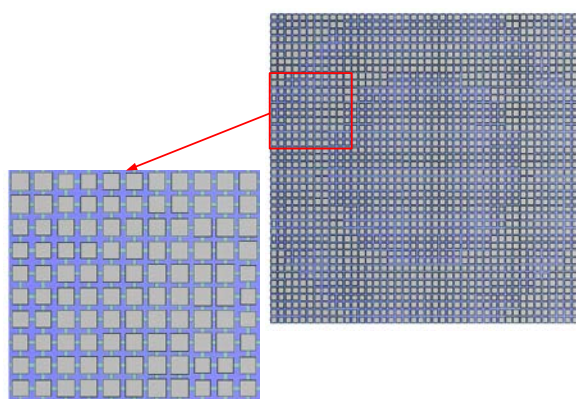


Рис. 13. Модель фокусирующей ЧСП

Fig. 13. Model of a focusing frequency-selective surface

шина АР составила 12 мм, а поперечные размеры – 250 × 250 мм. В данной модели был реализован угол наклона ДН, равный 20°, что видно из графика на рис. 12.

Для синтеза фокусирующей структуры в виде ЧСП (рис. 13) необходимо определить значения фазы электромагнитной волны, создаваемой источником со сферическим фазовым фронтом, на плоскости, находящейся на определенном

фокусном расстоянии F . Эти значения находятся из уравнения сферической волны, записанного в декартовой системе координат:

$$E(x, y) = E_0 \frac{e^{-ik\sqrt{x^2+y^2+F^2}}}{\sqrt{x^2+y^2+F^2}};$$

$$A(x, y) = \arg \left[E_0 \frac{e^{-ik\sqrt{x^2+y^2+F^2}}}{\sqrt{x^2+y^2+F^2}} \right],$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

После этого легко определить фазовые задержки, обеспечиваемые каждым отдельным ФКЭ в ЧСП.

В качестве облучателя представленной АР использовался стандартный конический рупор Ку-диапазона, $F = 260$ мм. Ниже приведены рассчитанные частотные зависимости S_{11} (рис. 14, а) и коэффициента направленного действия (КНД) (рис. 14, б) синтезированной структуры.

Из графиков видно, что S_{11} не превышает –15 дБ, а КНД изменяется от 25.8 до 28 дБ в диапазоне 10.7...12.7 ГГц. При этом коэффициент использования поверхности равен 0.45.

Далее приведены ДН для центральной и крайних значений частоты Ку-диапазона в плоскости E (рис. 15, а) и в плоскости H (рис. 15, б).

Как и ожидалось, наиболее высокий уровень боковых лепестков (–13 дБ) наблюдается на нижней частоте в плоскости H . Ширина ДН изменяется от 5 до 7°.

Обсуждение. В разработанном ПО в качестве исходного фильтра используется фильтр Чебышева 1-го типа. Он удовлетворяет поставленным задачам синтеза проходных АР. В дан-

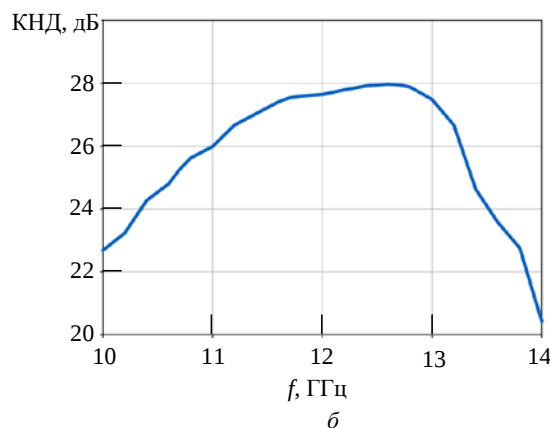
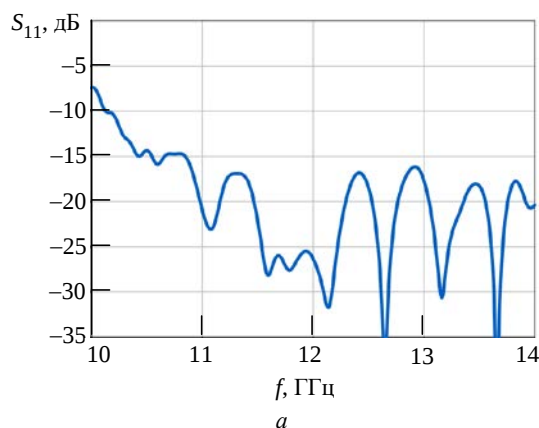


Рис. 14. Частотные зависимости коэффициента отражения (а) и КНД синтезированной структуры (б)

Fig. 14. Reflection coefficient (a) and directional coefficient of the synthesized structure (b)

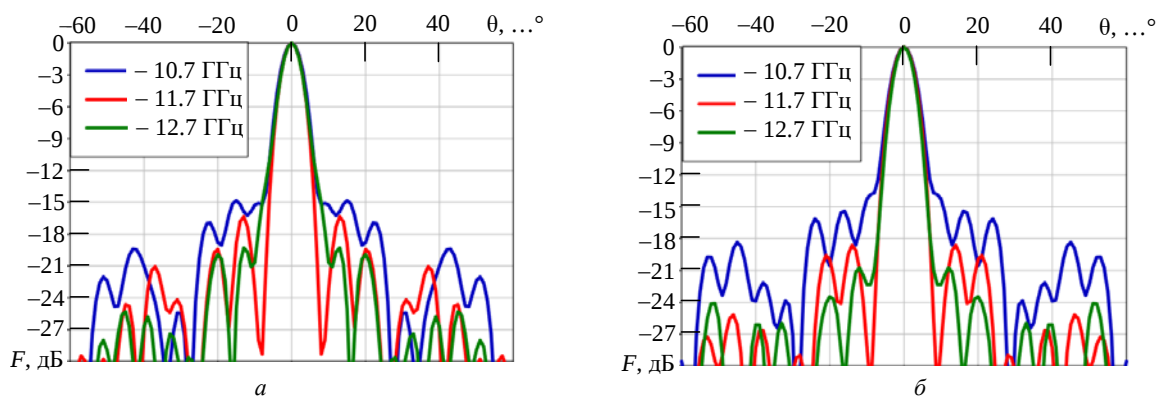


Рис. 15. ДН в плоскости E (а) и в плоскости H (б)

Fig. 15. Radiation pattern in the E -plane (а) and in the H -plane (б)

ной статье приведены характеристики синтезированных фильтров 3-го и 6-го порядков. При этом разработанное ПО позволяет рассчитывать фильтры четного и нечетного порядков с 3-го по 9-й. В дальнейшем планируется внедрение НЧ-прототипов других видов фильтров. Как показано в данной статье, полученные в результате синтеза ФКЭ можно использовать для проектирования отклоняющих и фокусирующих АР проходного типа. В свою очередь на основе отклоняющих структур можно разработать низкопрофильные сканирующие АС. Угол наклона ДН представленной отклоняющей структуры составляет 20° , что в сканирующей системе, содержащей две подобные структуры, позволит достичь максимального отклонения около 45° . Для реализации больших углов сканирования необходимо увеличить отклонение одним слоем до 30° . По результатам математического моделирования именно это значение дает максимальный наклон ДН АС, равный 90° . Следовательно, дальнейшее увеличение угла отклонения в одном слое не имеет смысла.

Закключение. Разработанное ПО позволяет синтезировать резонаторные фильтры и ФКЭ различных порядков по заданным характеристикам. Выходными данными являются как номиналы элементов схемы, так и размеры ФКЭ, а также АЧХ и ФЧХ. При проектировании ЧСП данное ПО позволяет в значительной степени сократить время, затрачиваемое на расчет и синтез большого количества ФКЭ. Построение графиков позволяет качественно оценить характеристики синтезированного фильтра и, при необходимости, внести изменения. Также для некоторых САПР возможно управлять построением электродинамических моделей непосредственно из разработанного ПО, что также положительно сказывается на временных затратах. Синтезированные при помощи данного ПО фокусирующие и отклоняющие структуры можно использовать для построения АР с механоэлектрическим типом сканирования для обеспечения спутниковой связи в движении, а также в наземных терминалах низкоорбитальных и среднеорбитальных систем спутниковой связи.

Авторский вклад

Станковский Андрей Вадимович – математическое моделирование; разработка фильтров на связанных резонаторах; разработка программного обеспечения, написание и отладка кода; электродинамическое моделирование ФКЭ.

Поленга Станислав Владимирович – математическое моделирование; электродинамическое моделирование фокусирующей структуры.

Стригова Елена Алексеевна – электродинамическое моделирование ЧСП; обработка расчетных данных.

Немшон Андрей Данилович – моделирование фильтров на сосредоточенных элементах; электродинамическое моделирование отклоняющей структуры.

Гафаров Евгений Раисович – синтез топологий ФКЭ; обработка расчетных данных.

Саломатов Юрий Петрович – общее руководство проектом.

Author's contribution

Andrey V. Stankovsky, mathematical modeling; filters on coupled resonators development; software development, code writing and debugging; electrodynamic modeling of PCE.

Синтез фазокорректирующих элементов на основе полосового фильтра

и их применение в антенных решетках проходного типа

Synthesis of Phase-Correcting Elements Based on Band-Pass Filter and Their Application in Transmitarray Antenna

Stanislav V. Polenga, mathematical modeling; focusing structure electrodynamic modeling.

Yelena A. Strigova, frequency selective surfaces electrodynamic modeling; processing of calculation data.

Andrey D. Nemshon, modeling of filters on concentrated elements; deflecting structure electrodynamic modeling.

Evgeniy R. Gafarov, synthesis of PCE topologies; computational data processing.

Yury P. Salomatov, general scientific project management.

Список литературы

1. Антенные системы с широкоугольным механическим сканированием / А. В. Станковский, С. В. Поленга, Е. А. Стригова, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 50–62.
doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-50-62
2. Khan M. R. A beam steering technique using dielectric wedges / Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London. 1985. 206 p.
3. Griffiths H. D., Khan M. R. Antenna beam steering technique using dielectric wedges // IEE Proc. H. Microwaves, Antennas and Propagation. 1989. Vol. 136, iss. 2. P. 126–131.
4. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) // Журн. техн. физики. 2013. Т. 83, № 1. С. 3–28.
doi: 10.1134/S1063784213010234
5. Гуляев Ю. В., Лагарьев А. Н., Никитов С. А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Вестн. РАН. 2008. Т. 78, № 5. С. 438–449.
6. Engheta N., Ziolkowski R. W. Metamaterials: physics and engineering explorations. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 440 p.
doi: 10.1002/0471784192
7. Полосно-пропускающий фильтр из диэлектрических слоев с субволновыми решетками полосковых проводников на границах / Б. А. Беляев, В. В. Тюрнев, А. С. Волошин, Ан. А. Лексиков, Р. Г. Галеев, В. Ф. Шабанов // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494, № 1. С. 75–81.
doi: 10.31857/s2686740020050041
8. Al-Joumayly M. A., Behdad N. Wideband Planar Microwave Lenses Using Sub-Wavelength Spatial Phase Shifters // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, № 12. P. 4542–4552.
doi: 10.1109/TAP.2011.2165515
9. White C. R., Ebling J. P., Rebeiz G. A wide-scan printed planar K-band microwave lens // IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. 2005. Vol. 4. P. 313–316.
doi: 10.1109/APS.2005.1552652
10. Singh N., Choure K. K., Kumari M. A Survey on Free-Standing Phase Correcting gain enhancement Devices // Int. J. of Sci. & Eng. Research. 2013. Vol. 4, iss. 7. P. 109–115.
11. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley-Interscience, 2000. 440 p.
doi: 10.1002/0471723770
12. A broadband sub-wavelength phase-correcting element for transmit antenna arrays / A. D. Nemshon, A. M. Alexandrin, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, V. S. Panko, Yu. P. Salomatov // 24th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol, 07–13 Sept. 2014. IEEE, 2014. P. 469–470.
doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959483
13. Synthesis of Spatial Band-Pass Filter Based on Frequency-Selective Surfaces / A. V. Stankovsky, Ye. A. Litinskaya, A. D. Nemshon, S. V. Polenga, Yu. P. Salomatov // Ural Symp. on Biomedical Eng., Radioelectronics and Information Technology, Yekaterinburg, Russia, 13–14 May 2021. IEEE, 2021. P. 234–237.
doi: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455106
14. Simple and accurate analytical model of planar grids and high-impedance surfaces comprising metal strips or patches / O. Luukkonen, C. Simovski, G. Granet, G. Goussetis, D. Lioubtchenko, A. V. Raisanen, S. A. Tretyakov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56, № 6. P. 1624–1632.
doi: 10.1109/TAP.2008.923327
15. Li M., Al-Joumayly M. A., Behdad N. Broadband True-Time-Delay Microwave Lenses Based on Miniaturized Element Frequency Selective Surfaces // IEEE transactions on antennas and propagation. 2013. Vol. 61, № 3. P. 1166–1179.
doi: 10.1109/TAP.2012.2227444
16. Gagnon N., Petosa A. Using Rotatable Planar Phase Shifting Surfaces to Steer a High-Gain Beam // IEEE transactions on antennas and propagation. 2013. Vol. 61, № 6. P. 3086–3092.
doi: 10.1109/TAP.2013.2253298
17. Zverev A. I. Handbook of filter synthesis. New York: John Wiley and Sons, 1967. 592 p.
18. Al-Joumayly M. A., Behdad N. A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements // IEEE transactions on antennas and propagation. 2010. Vol. 58, № 12. P. 4033–4041.
doi: 10.1109/TAP.2010.2078474
19. Алексеев Л. В., Знаменский А. Е., Лоткова Е. Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. М.: Связь, 1976. 281 с.

Информация об авторах

Станковский Андрей Вадимович – кандидат технических наук (2023), инженер-исследователь, старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; сканирующие антенные системы; квазиоптические антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: stankovskiy_a@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-6059-5638>

Поленга Станислав Владимирович – магистр по направлению "Радиотехника" (2009, Сибирский федеральный университет), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 58 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; отражательные антенные решетки, квазиоптические антенны, метаматериалы.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия
E-mail: twinlive@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

Стригова Елена Алексеевна – кандидат технических наук (2022), старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 42 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; спутниковая связь; сканирующие антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ylitinskaya@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

Немшон Андрей Даниилович – магистр по направлению "Радиотехника" (2013, Сибирский федеральный университет), техник кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 19 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; сканирующие антенные системы; квазиоптические антенны.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: nemshon@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-0480-5826>

Гафаров Евгений Раисович – кандидат технических наук (2021), доцент кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; спутниковая радионавигация; цифровые антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: Egafarov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны и антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

References

1. Stankovsky A. V., Polenga S. V., Strigova Ye. A., Salomatov Yu. P. Antenna Systems with Wide-Angle Mechano-electrical Beam Steering. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, iss. 5, pp. 50–62. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-50-62
2. Khan M. R. A beam steering technique using dielectric wedges. Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, 1985, 206 p.
3. Griffiths H. D., Khan M. R. Antenna Beam Steering Technique Using Dielectric Wedges. IEE Proc. H. Microwaves, Antennas and Propagation. 1989, vol. 136, iss. 2, pp. 126–131.
4. Vendik I. B., Vendik O. G. Metamaterials and Their Application in Microwaves: A Review. J. of Technical Physics. 2013, vol. 83, no. 1, pp. 3–28. (In Russ.)
doi: 10.1134/S1063784213010234
5. Guljaev Ju. V., Lagar'kov A. N., Nikitov S. A. Metamaterials: Fundamental Research and Prospects of Application. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2008, vol. 78, no. 5, pp. 438–449. (In Russ.)
6. Engheta N., Ziolkowski R. W. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. New Jersey,

John Wiley & Sons, 2006, 440 p.
doi: 10.1002/0471784192

7. Beljaev B. A., Tjurnev V. V., Voloshin A. S., Leksikov An. A., Galeev R. G., Shabanov V. F. Band-pass Filter on Dielectric Layers with Strip Conductor Grids on Their Interface. Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences. 2020, vol. 494, no. 1, pp. 75–81. (In Russ.)
doi: 10.31857/s2686740020050041

8. Al-Joumayly M. A., Behdad N. Wideband Planar Microwave Lenses Using Sub-Wavelength Spatial Phase Shifters. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011, vol. 59, no. 12, pp. 4542–4552.
doi: 10.1109/TAP.2011.2165515

9. White C. R., Ebling J. P., Rebeiz G. A Wide-Scan Printed Planar K-Band Microwave Lens. IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. 2005, vol. 4, pp. 313–316.
doi: 10.1109/APS.2005.1552652

10. Singh N., Choure K. K., Kumari M. A Survey on Free-Standing Phase Correcting gain enhancement Devices. Int. J. of Sci. & Eng. Research. 2013, vol. 4, iss. 7, pp. 109–115.

11. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York, Wiley-Interscience, 2000, 440 p.
doi: 10.1002/0471723770

12. Nemshon A. D., Alexandrin A. M., Polenga S. V., Stankovsky A. V., Panko V. S., Salomatov Yu. P. A Broadband Sub-Wavelength Phase-Correcting Element for Transmit Antenna Arrays. 24th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol, 07–13 Sept. 2014, IEEE, 2014, pp. 469–470.
doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959483

13. Stankovsky A. V., Litinskaya Ye. A., Nemshon A. D., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Synthesis of Spatial Band-Pass Filter Based on Frequency-Selective Surfaces. Ural Symp. on Biomedical Eng., Radioelectronics and Information Technology. Yekaterinburg, Russia, 13–14 May 2021. IEEE, 2021. P. 234–237.
doi: 10.1109/USBERIT51232.2021.9455106

14. Luukkonen O., Simovski C., Granet G., Goussetis G., Lioubtchenko D., Raisanen A. V., Tretyakov S. A. Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008, vol. 56, no. 6, pp. 1624–1632.

doi: 10.1109/TAP.2008.923327

15. Li M., Al-Joumayly M. A., Behdad N. Broadband True-Time-Delay Microwave Lenses Based on Miniaturized Element Frequency Selective Surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013, vol. 61, no. 3, pp. 1166–1179.
doi: 10.1109/TAP.2012.2227444

16. Gagnon N., Petosa A. Using Rotatable Planar Phase Shifting Surfaces to Steer a High-Gain Beam. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013, vol. 61, no. 6, pp. 3086–3092.
doi: 10.1109/TAP.2013.2253298

17. Zverev A. I. Handbook of Filter Synthesis. New York, John Wiley and Sons, 1967, 592 p.

18. Al-Joumayly M. A., Behdad N. A Generalized Method for Synthesizing Low-Profile, Band-Pass Frequency Selective Surfaces with Non-Resonant Constituting Elements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010, vol. 58, no. 12, pp. 4033–4041.
doi: 10.1109/TAP.2010.2078474

19. Alekseev L. V., Znamensky A. E., Lotkova E. D. Electric Filters of Meter and Decimeter Ranges. Moscow, 1976, 281 p. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey V. Stankovsky, Cand. Sci. (Eng.) (2023), Research Engineer, Senior Lecturer of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 35 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; scanning antenna systems; quasi-optical antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: stankovskiy_a@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-6059-5638>

Stanislav V. Polenga, Master's degree in Radio Engineering (2009, Siberian Federal University), Senior Lecturer of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 58 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; reflectarrays; quasi-optical antennas; metamaterials.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: twinlive@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1375-2629>

Yelena A. Strigova, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Senior Lecturer of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 42 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; satellite communication; scanning antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4442-8047>

Andrey D. Nemshon, Master's degree in Radio Engineering (2013, Siberian Federal University), Technician of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 19 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; scanning antenna systems; quasi-optical antennas.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: nemshon@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-0480-5826>

Evgeniy R. Gafarov, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Associate professor of Radio Engineering Department of Siberian Federal University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; satellite radionavigation; digital antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: Egafarov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7810-7196>

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of Department of Radio Engineering of Siberian Federal University. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays; digital phased arrays; quasi-optical antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4309-226X>

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 621.391

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-2-33-44>

Алгоритмы комплексного обнаружения объектов в беспроводных сенсорных сетях

В. И. Парфенов[✉], Ч. Т. Буй

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

✉ vip@phys.vsu.ru

Аннотация

Введение. Беспроводные сенсорные сети могут применяться для решения многих народнохозяйственных задач, в том числе и для обнаружения интересующего объекта (явления). Большинство известных алгоритмов обработки информации в таких сетях строятся в соответствии с радиальной архитектурой. Такой подход предполагает, что каждый сенсор имеет доступ непосредственно к центральному узлу, осуществляющему окончательное вынесение решения. В то же время данный подход не всегда реализуем на практике, в частности, из-за сложного рельефа местности. В связи с чем в статье предложен алгоритм обнаружения при последовательной передаче информации от сенсора к сенсору, позволяющий расширить зону обнаружения и увеличить время функционирования источников питания сенсоров.

Цель работы. Синтез и анализ комплексного алгоритма обнаружения объекта в беспроводной сенсорной сети с линейной топологией.

Материалы и методы. Синтез алгоритма обнаружения основывался на статистической теории оптимального обнаружения сигналов, а конкретно, на следующей априорной информации: вероятностях ошибок обнаружения объекта каждого сенсора и вероятностях ошибок в каналах связи. Анализ эффективности синтезированного алгоритма выполнялся численно с помощью программы MATLAB.

Результаты. В ходе исследований предложен алгоритм комплексного обнаружения объектов в беспроводных сенсорных сетях. Приведены результаты, характеризующие эффективность синтезированного алгоритма. В частности, проанализировано влияние таких параметров, как отношение сигнал/шум и количество сенсоров в системе на эффективность обнаружения.

Заключение. Показано, что анализ синтезированного алгоритма может быть выполнен точно. Причем параметры самого алгоритма и вероятности ошибок при переходе от сенсора к сенсору определяются достаточно простыми рекуррентными выражениями. Возможными перспективными направлениями исследований являются исследования, связанные с влиянием на эффективность обнаружения каналов связи с замираниями и рассеянием, а также разработка комплексных алгоритмов обнаружения при неизвестных координатах цели.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, сенсоры, вероятности ошибок, комплексное обнаружение, алгоритмы комплексного обнаружения

Для цитирования: Парфенов В. И., Буй Ч. Т. Алгоритмы комплексного обнаружения объектов в беспроводных сенсорных сетях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 33–44.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-33-44

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; принята к публикации после рецензирования 24.11.2024; опубликована онлайн 30.04.2025



Algorithms for Integrated Object Detection in Wireless Sensor Networks

V. I. Parfenov✉, T. T. Bui

Voronezh State University, Voronezh, Russia

✉ vip@phys.vsu.ru

Abstract

Introduction. Wireless sensor networks can be used to solve various economic problems, including detection of objects (phenomena) of interest. Most of the well-known information processing algorithms in such networks are built according to a radial architecture. Such an approach assumes each sensor to have a direct access to the central node responsible for making the final decision. At the same time, this approach cannot always be implemented in practice, largely due to the complicated topography of the area. In this connection, the development of an integrated detection algorithm for sequential transmission of information from sensor to sensor is a relevant research task. This algorithm will contribute to improving the efficiency of decision making, extending the detection area and increasing the operation duration of the power sources of sensors.

Aim. Synthesis and analysis of an integrated algorithm for object detection in wireless sensor networks with a linear topology.

Materials and methods. The detection algorithm was synthesized based on the statistical theory of optimal signal detection and, specifically, on the following a priori information: the probability of errors in the detection of each sensor object and the probability of errors in communication channels. The efficiency of the synthesized algorithm was evaluated numerically in the MATLAB environment.

Results. An algorithm for integrated detection of objects in wireless sensor networks was proposed. The efficiency of the developed algorithm was evaluated and the influence of such parameters as the signal/noise ratio and the number of sensors in the system on the detection efficiency was analyzed.

Conclusion. The analysis of the synthesized algorithm can be performed with sufficient accuracy, with the algorithm parameters and the probability of errors when moving from sensor to sensor being determined by fairly simple recurrent expressions. Future research directions should address the influence of communication channels with fading and scattering on the detection efficiency, as well as the development of integrated detection algorithms with unknown target coordinates.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSN), sensors, error probability, integrated detection, integrated detection algorithms

For citation: Parfenov V. I., Bui T. T. Algorithms for Integrated Object Detection in Wireless Sensor Networks. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 33–44.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-33-44

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 02.09.2024; accepted 24.11.2024; published online 30.04.2025

Введение. Беспроводные сенсорные сети (БСС) обладают достаточно важными свойствами, такими как гибкость, мобильность, экономическая эффективность и пр., способствующими расширению области применения таких сетей. Действительно, их начинают активно применять не только в военных приложениях, но и в гражданских областях, особенно связанных с мониторингом окружающей среды [1–3]. К сожалению, к настоящему времени не разработано единого стандарта для построения таких сетей. Так, с точки зрения архитектуры сети может быть использована "линейная", "радиаль-

ная", "древовидная" и другие типы топологий. Для организации множественного доступа к каналу "сенсоры – центральный узел" также разработано достаточно большое количество протоколов, таких как S-MAC [4], SFSN [5] и др. Наиболее известными из протоколов БСС являются протоколы альянса ZigBee [6], которые позволяют устройствам находиться в спящем режиме большую часть времени, что продлевает срок службы батарей. Расположение сенсоров в пространстве существенным образом зависит от рельефа местности. Учитывая миниатюрный характер сенсоров и ограниченную энергоэф-

фективность используемых в сенсорах источников питания, длины передаваемых пакетов стремятся выбирать как можно меньше.

Одной из важнейших задач в таких сетях является задача обнаружения некоторых объектов или явлений (далее – просто целей) [7–9]. Наибольшее количество информации об исследуемом объекте, очевидно, можно извлечь и эффективно использовать для решения поставленной задачи, если каждый сенсор БСС всю информацию, получаемую от объекта, будет передавать непосредственно в центральный узел (ЦУ). При этом окончательное решение о наличии или отсутствии объекта будет выноситься в этом ЦУ на основании всего объема полученных от сенсоров данных. Однако отличительными особенностями БСС являются малогабаритный характер отдельных сенсоров, их зависимость от энергоемкости используемых источников питания и пр. [10]. В связи с этим в таких сетях целесообразно использовать подход, основанный на так называемой комплексной обработке информации, при котором каждый сенсор должен сам выносить решение об обнаружении или необнаружении объекта наблюдения на основе поступающих данных и передавать эту информацию в ЦУ. Центральный узел на основе принятой от всех сенсоров информации подобного рода должен вынести окончательное (комплексное) решение о наличии или отсутствии цели. Однако следует учитывать, что передача этой информации от сенсоров к ЦУ напрямую в некоторых случаях неосуществима. Это объясняется, в частности, возможной значительной удаленностью некоторых сенсоров от ЦУ, сложным характером рельефа местности, не позволяющим обеспечить условия "прямой видимости" для каждого канала связи "*i*-й сенсор – ЦУ", и другими причинами. В таких условиях информация должна последовательно передаваться от сенсора к сенсорам. Однако следует учитывать, что при таком способе передачи информация может претерпевать существенные искажения. Следовательно, необходимо разработать алгоритмы комплексного обнаружения целей в таких сетях и исследовать их эффективность. Очевидно, такие алгоритмы будут отличаться от широко известных алгоритмов, синтезированных для се-

тей с радиальной топологией типа "звезда", при которой информация от отдельных сенсоров передается непосредственно в ЦУ (например, [11–13]). Все это свидетельствует об актуальности данной темы исследования.

В данной статье рассматриваются такие беспроводные системы, в которых датчики сенсоров наблюдают за одним и тем же объектом или явлением и самостоятельно выносят решения об обнаружении или необнаружении объекта. Далее эта информация, которую можно представить в бинарной форме (обнаружен объект или нет), передается от сенсора к сенсорам (например, [14]) и специальным образом обрабатывается в каждом сенсоре сети. Все сенсоры пронумерованы от 1 до K , и последний K -й сенсор располагается ближе всех к ЦУ в пределах прямой видимости.

Цель работы – синтез алгоритма комплексного обнаружения объекта в БСС и исследование его эффективности.

Методы передачи и обработки информации в БСС при последовательной передаче данных. Постановка задачи. Предположим, что БСС, содержащая K сенсоров, осуществляет наблюдение за одним общим объектом. Задача, решаемая каждым сенсором, заключается в определении наличия или отсутствия данного объекта. Сами локальные сенсоры могут располагаться в любом месте относительно ЦУ. Единственное необходимое условие: сенсоры должны располагаться так, чтобы было возможно организовать последовательную передачу информации от одного сенсора к другому. Все сенсоры равноправны, для большей эффективности располагать их целесообразно как можно ближе к объекту наблюдения (хотя это и не всегда возможно).

Топология рассматриваемой сети – "линейная". Для доставки сенсорных данных в ЦУ используется режим push [15], при котором передача данных осуществляется по командам, поступающим от ЦУ, с помощью пакетов одинаковой небольшой длины. Необходимо разработать алгоритм (желательно, оптимальный в каком-то смысле) обнаружения объекта наблюдения в ЦУ по данным, поступившим от сенсоров. Такой алгоритм может быть синтезирован по-разному, в зависимости от имеющихся ап-

паратных возможностей сенсоров. Например, в [16] предполагается, что каждый сенсор выносит собственное локальное решение о наличии или отсутствии цели и пристыковывает (инкапсулирует) эту информацию к той, которая была получена от предыдущих сенсоров. Таким образом, в ЦУ приходит пакет, содержащий решения, выносимые каждым сенсором относительно объекта наблюдения. Следовательно, чем большее расстояние проходит такой пакет передаваемых данных, тем длиннее он становится. При этом, очевидно, возрастает нагрузка на энергоёмкость источников питания каждого следующего сенсора. Если же энергоёмкости у всех сенсоров одинаковы, то удаленные сенсоры будут вырабатывать свой энергетический ресурс намного раньше, чем первые.

В связи с этой негативной особенностью подобного подхода рассмотрим следующий. Объем передаваемой информации должен быть минимален. Потенциально он должен содержать только номера сенсоров и ЦУ, а также решение, выносимое сенсором. В связи с этим будем считать, что каждый сенсор выполняет три функции. Первая функция заключается в следующем: каждый i -й локальный сенсор обладает некоторым встроенным в него алгоритмом обнаружения. Этот алгоритм может быть реализован разными способами, но наиболее часто он представляет собой стандартный энергетический приемник. Используя этот приемник, каждый сенсор выносит локальное решение о наличии или отсутствии этого объекта.

Однако далее в соответствии со второй функцией, в отличие от стандартных методов, i -й сенсор не только сам выносит решение, но и принимает информацию от соседнего $(i - 1)$ -го сенсора. Таким образом, в i -м сенсоре появляются два бинарных решения (собственное и от соседнего сенсора). Эти решения необходимо объединить в одно общее, используя некоторый комплексный алгоритм обработки этих данных. Наконец, третья функция заключается в непосредственной передаче получаемого решения далее по радиоканалу к $(i + 1)$ -му сенсору. Если $i = K$, то информация от этого сенсора передается уже непосредственно в ЦУ. Количество используемых в сети узлов фиксировано и известно априори.

Окончательно в ЦУ приходит пакет данных, содержащий обработанную информацию от последнего сенсора (рис. 1). Далее ЦУ в результате принятого от последнего сенсора сигнала должен вынести окончательное (комплексное) решение о наличии или отсутствии объекта. На рис. 1 обозначены: $S_1 \dots S_K$ – сенсоры, входящие в сеть (причем их взаимное расположение необязательно должно быть чисто линейным, как изображено на рис. 1); $P_1 \dots P_K$ – вероятности ошибок при передаче от сенсора к сенсору; ЦУ – центральный узел, принимающий данные от последнего сенсора и выносящий окончательное решение; в соответствии с типичной формулировкой задачи обнаружения сигналов на фоне помех H_1 и H_0 – гипотезы: считается, что при выполнении первой

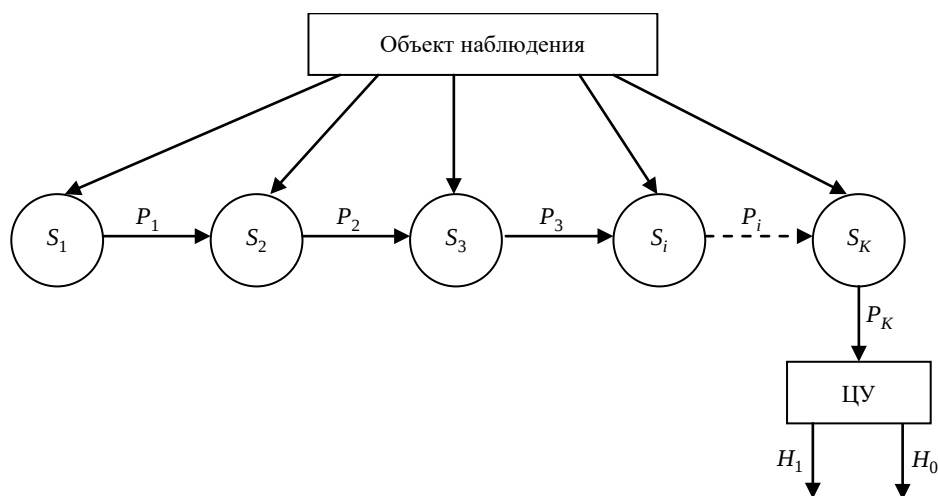


Рис. 1. Структурная схема обработки информации в беспроводных сенсорных сетях

Fig. 1. Block diagram of information processing in wireless sensor networks

из них объект присутствует в зоне наблюдения, а при выполнении второй – нет. В дальнейшем предполагалось, что априорные вероятности этих гипотез одинаковы и равны 0.5.

Таким образом, необходимо разработать наилучшие в определенном смысле алгоритмы комплексного обнаружения, причем использоваться они должны в каждом сенсоре (кроме первого) и в ЦУ. Разработке подобных алгоритмов и будет посвящена данная статья. Следует заметить, что при разработке таких алгоритмов необходимо учитывать ошибки, которые могут возникать на различных этапах функционирования разрабатываемой системы. Действительно, локальные сенсоры могут выносить неверные решения о наличии или отсутствии объекта наблюдения из-за наличия помех в каналах "объект–сенсор". Кроме того, дополнительные ошибки могут возникать из-за помех в каналах "($i-1$)-й сенсор – i -й сенсор". Поэтому комплексирование должно осуществляться с учетом всех этих возможных ошибок. Отметим, что при таком подходе не ставится задача синтезировать такой алгоритм, который основывался бы на оптимизации всей системы. Для решения подобной задачи требуется адаптивно изменять в лучшем случае параметры, а в худшем – и саму структуру алгоритмов в каждом сенсоре. Такой подход в БСС вряд ли может считаться целесообразным, учитывая, как отмечалось ранее, малогабаритный характер отдельных сенсоров и их существенную зависимость от энергоемкости используемых источников питания. В связи с этим предлагается в каждом сенсоре и в ЦУ оптимизацию осуществлять независимо в соответствии с критерием идеального наблюдателя. Именно такой подход и рассматривается в данной статье.

Итак, i -й локальный сенсор S_i выносит одно из двух локальных решений, а именно решение $u_i = 1$, если этот сенсор обнаружил объект, и $u_i = -1$, если сенсор его не обнаружил. Обозначим $\alpha_i = P[u_i = 1 | H_0]$ – вероятность ошибки первого рода (ложной тревоги); $\beta_i = P[u_i = -1 | H_1]$ – вероятность ошибки второго рода (пропуска цели) i -м сенсором

($i = 1, \dots, K$). Рассмотрим, например, первый сенсор. Он на основании своих собственных наблюдений и имеющегося у него алгоритма выносит решение $u_1 = 1$ или $u_1 = -1$ и передает его во второй сенсор с вероятностью ошибки при передаче P_1 . Таким образом, во втором сенсоре появится пакет $u_1^{(2)}$, принятый от первого сенсора. Нижний индекс показывает номер сенсора, от которого приходит информация, а верхний – в каком сенсоре эта информация далее должна обрабатываться. Пришедшая от первого сенсора информация дополняется собственной информацией второго сенсора u_2 .

Второй сенсор, основываясь на $u_1^{(2)}$ и u_2 , должен вынести общее решение первого и второго сенсоров о наличии или отсутствии объекта. В результате второй сенсор создает пакет вида U_2 , который и передается далее третьему сенсору сети. Подобная процедура продолжается в каждом последующем сенсоре. Таким образом, в отличие от [16], где длина передаваемых пакетов все время возрастает, при таком подходе каждый сенсор передает пакет одной и той же длины, что выгодно с точки зрения экономии энергоемкости источников питания сенсоров. Таким образом, окончательно в ЦУ придет один пакет U_K . В ЦУ на основе этой получаемой информации и выносится окончательное решение об обнаружении или необнаружении объекта.

Из вышеизложенного становится понятным принцип, на основе которого можно синтезировать оптимальные алгоритмы обнаружения объекта, применяемые в отдельных сенсорах. Для самого первого сенсора все очевидно: этот сенсор, основываясь на своих собственных наблюдениях и встроенном в нем алгоритме обнаружения, выносит решение u_1 и передает его в сенсор с номером 2. Вероятности ошибок на этом этапе определяются помехами в канале "объект – 1-й сенсор" и равны $\alpha_{\Sigma_1} = \alpha_1$, $\beta_{\Sigma_1} = \beta_1$. Вынесенное первым сенсором решение u_1 передается во второй сенсор. Вторым сенсор также сам на основании собственных

наблюдений и встроенного алгоритма обнаружения выносит решение о наличии или отсутствии объекта u_2 . Кроме того, к нему поступает информация от первого сенсора (возможно, искаженная за счет помех), которую обозначим, как и ранее, $u_1^{(2)}$. Основываясь на этих двух информационных посылках, необходимо синтезировать оптимальный алгоритм их объединения (комплексирования) с целью получения одного решения U_2 , которое и будет передаваться далее. Синтез такого алгоритма будет, как обычно, основываться на построении отношения правдоподобия. Действительно, несложно заметить, что отношение правдоподобия в данном случае можно

$$\text{представить в виде } \Lambda_2 = \frac{P(H_{u_2}, H_{u_1^{(2)}} | H_1)}{P(H_{u_2}, H_{u_1^{(2)}} | H_0)}.$$

Здесь $P(\cdot)$ – условные совместные вероятности выполнения гипотез H_{u_2} и $H_{u_1^{(2)}}$ при выполнении соответствующей гипотезы H_j ($j = 0, 1$). Каждая из приведенных гипотез с соответствующим индексом может совпасть либо с гипотезой H_1 (наличие объекта) либо с гипотезой H_0 (отсутствие объекта). Учитывая независимость вынесения решений в пользу H_{u_2} и $H_{u_1^{(2)}}$, отношение правдоподобия можно пере-

$$\text{писать в виде } \Lambda_2 = \frac{P(H_{u_2} | H_1) P(H_{u_1^{(2)}} | H_1)}{P(H_{u_2} | H_0) P(H_{u_1^{(2)}} | H_0)}.$$

В то же время условные вероятности, входящие в это выражение, могут быть переписаны следующим образом:

$$P(H_{u_2} | H_1) = \begin{cases} (1 - \beta_2), & u_2 = 1, \\ \beta_2, & u_2 = -1; \end{cases}$$

$$P(H_{u_1^{(2)}} | H_1) = \begin{cases} \beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1), & u_1^{(2)} = 1, \\ \beta_1(1 - P_1) + (1 - \beta_1)P_1, & u_1^{(2)} = -1; \end{cases}$$

$$P(H_{u_2} | H_0) = \begin{cases} \alpha_2, & u_2 = 1, \\ 1 - \alpha_2, & u_2 = -1; \end{cases}$$

$$P(H_{u_1^{(2)}} | H_0) = \begin{cases} \alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1, & u_1^{(2)} = 1, \\ \alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1), & u_1^{(2)} = -1. \end{cases}$$

Основываясь на полученных выражениях, получаем, что во втором сенсоре необходимо использовать следующий комплексный алгоритм обнаружения цели: на основе имеющихся данных u_2 и $u_1^{(2)}$ рассчитывается логарифм отношения правдоподобия M_2 и, если $M_2 > h_2$, выносится решение в пользу гипотезы H_1 , если же $M_2 < h_2$, то в пользу гипотезы H_0 , где

$$M_2 = \ln(\Lambda_2). \quad (1)$$

Здесь h_2 – порог обнаружения, который в дальнейшем определялся в соответствии с критерием идеального наблюдателя [17]. Несложно показать, что логарифм отношения правдоподобия M_2 в (1) может быть записан в виде

$$M_2 = \begin{cases} C11_2, & u_2 = 1, u_1^{(2)} = 1; \\ C12_2, & u_2 = -1, u_1^{(2)} = 1; \\ C21_2, & u_2 = 1, u_1^{(2)} = -1; \\ C22_2, & u_2 = -1, u_1^{(2)} = -1, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$C11_2 = \ln \left(\frac{(1 - \beta_2) [\beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1)]}{\alpha_2 [\alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1]} \right);$$

$$C12_2 = \ln \left(\frac{\beta_2 [\beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1)]}{(1 - \alpha_2) [\alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1]} \right);$$

$$C21_2 = \ln \left(\frac{(1 - \beta_2) [\beta_1(1 - P_1) + (1 - \beta_1)P_1]}{\alpha_2 [\alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1)]} \right);$$

$$C22_2 = \ln \left(\frac{\beta_2 [\beta_1(1 - P_1) + (1 - \beta_1)P_1]}{(1 - \alpha_2) [\alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1)]} \right).$$

Вероятности ошибок (ложной тревоги и пропуска сигнала) для этого алгоритма могут быть найдены по определению [17] и записаны в виде

$$\alpha_{\Sigma 2} = [\alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1] \times \\ \times \{ \alpha_2 \sigma(C11_2 - h_2) + (1 - \alpha_2) \sigma(C12_2 - h_2) \} +$$

$$\begin{aligned}
 & + [\alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1)] \times \\
 & \times \{ \alpha_2 \sigma(C21_2 - h_2) + (1 - \alpha_2) \sigma(C22_2 - h_2) \}; \\
 & \beta_{\Sigma_2} = [\beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1)] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_2) \sigma(h_2 - C11_2) + \beta_2 \sigma(h_2 - C12_2) \} + \\
 & + [\beta_1 (1 - P_1) + (1 - \beta_1) P_1] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_2) \sigma(h_2 - C21_2) + \beta_2 \sigma(h_2 - C22_2) \},
 \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma(\cdot)$ – функция единичного скачка (функция Хевисайда).

Подобные рассуждения выполняем последовательно для каждого сенсора: третьего, четвертого, ..., K -го. Несложно показать, что для последнего K -го сенсора в сети комплексный алгоритм обнаружения будет выглядеть аналогично (1), (2), а именно выносятся решение в пользу гипотезы H_1 , если $M_K = \ln(\Lambda_K) > h_K$; если же $M_K = \ln(\Lambda_K) < h_K$, то решение выносятся в пользу H_0 . Здесь, как и ранее, M_K – логарифм отношения правдоподобия, а h_K – порог обнаружения. Причем логарифм отношения правдоподобия описывается формулой, аналогичной (2), куда вместо индекса "2" следует подставить индекс " K ", а индекс "1" заменить на " $K - 1$ ". Кроме того,

$$\begin{aligned}
 C11_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_K) [\beta_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]}{\alpha_K [\alpha_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]} \right]; \\
 C12_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{\beta_K [\beta_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]}{(1 - \alpha_K) [\alpha_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]} \right];
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 C21_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_K) [\beta_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]}{\alpha_K [\alpha_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]} \right]; \\
 C22_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{\beta_K [\beta_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]}{(1 - \alpha_K) [\alpha_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]} \right].
 \end{aligned}$$

Порог обнаружения h_K также выбирается в соответствии с критерием идеального наблюдателя, причем вероятности ошибок обнаружения будут определяться аналогично (3):

$$\begin{aligned}
 \alpha_{\Sigma_K} &= [\alpha_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}] \times \\
 & \times \{ \alpha_K \sigma(C11_K - h_K) + (1 - \alpha_K) \sigma(C12_K - h_K) \} + \\
 & + [\alpha_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})] \times \\
 & \times \{ \alpha_K \sigma(C21_K - h_K) + (1 - \alpha_K) \sigma(C22_K - h_K) \}; \\
 \beta_{\Sigma_K} &= [\beta_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_K) \sigma(h_K - C11_K) + \beta_K \sigma(h_K - C12_K) \} + \\
 & + [\beta_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_K) \sigma(h_K - C21_K) + \beta_K \sigma(h_K - C22_K) \}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим процедуру синтеза алгоритма, используемого в ЦУ. От K -го сенсора в ЦУ передается U_K , из-за возможных искажений при такой передаче эта информация может исказиться. Поэтому входными данными для ЦУ будет, возможно, искаженный пакет, который обозначим как $u_K^{(\text{ЦУ})}$. Алгоритм вынесения окончательного решения в ЦУ также основывается на построении отношения правдоподобия $\Lambda_{\text{ЦУ}}$, причем он будет зависеть от вероятностей ошибок (5) и вероятностей P_i ($i = 1, \dots, K$). Несложно показать, что выражение для такого логарифма отношения правдоподобия можно представить в виде

$$M_{\text{ЦУ}} = \ln(\Lambda_{\text{ЦУ}}) = \begin{cases} c_1, & u_K^{(\text{ЦУ})} = 1; \\ c_2, & u_K^{(\text{ЦУ})} = -1, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_{\Sigma_K})(1 - P_K) + \beta_{\Sigma_K} P_K}{\alpha_{\Sigma_K} (1 - P_K) + (1 - \alpha_{\Sigma_K}) P_K} \right]; \\
 c_2 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_{\Sigma_K}) P_K + \beta_{\Sigma_K} (1 - P_K)}{\alpha_{\Sigma_K} P_K + (1 - \alpha_{\Sigma_K})(1 - P_K)} \right].
 \end{aligned}$$

Окончательно получаем, что в ЦУ на основе принятых данных $u_K^{(\text{ЦУ})}$ решение о наличии или

отсутствии объекта наблюдения будет выноситься в соответствии с алгоритмом:

1) если $M_{ЦУ} = \ln(\Lambda_{ЦУ}) > h_{ЦУ}$, то выносится решение о том, что объект присутствует в зоне наблюдения сети (выполняется гипотеза H_1);

2) если же $M_{ЦУ} = \ln(\Lambda_{ЦУ}) < h_{ЦУ}$, то решение выносится в пользу H_0 (объект отсутствует в зоне наблюдения).

Порог обнаружения $h_{ЦУ}$, как и ранее, выбирался в соответствии с критерием идеального наблюдателя, а вероятности ошибок обнаружения будут находиться аналогично (3), (5):

$$\begin{aligned} \alpha_{\Sigma_{ЦУ}} &= \\ &= \left[\alpha_{\Sigma_K} (1 - P_K) + (1 - \alpha_{\Sigma_K}) P_K \right] \sigma(c_1 - h_{ЦУ}) + \\ &+ \left[\alpha_{\Sigma_K} P_K + (1 - \alpha_{\Sigma_K}) (1 - P_K) \right] \sigma(c_2 - h_{ЦУ}); \\ \beta_{\Sigma_{ЦУ}} &= \\ &= \left[(1 - \beta_{\Sigma_K}) (1 - P_K) + \beta_{\Sigma_K} P_K \right] \sigma(h_{ЦУ} - c_1) + \\ &+ \left[(1 - \beta_{\Sigma_K}) P_K + \beta_{\Sigma_K} (1 - P_K) \right] \sigma(h_{ЦУ} - c_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Параметры, определяющие работу алгоритмов в каждом сенсоре (2), (4), (6), и их характеристики эффективности (3), (5), (7) описываются достаточно простыми рекуррентными формулами, особенно удобными при цифровой реализации.

Подчеркнем еще раз, что для использования синтезированных алгоритмов необходимо знать не только вероятности ошибок обнаружения для каждого локального сенсора α_i и β_i , но и вероятности ошибок при передаче информации в каналах связи, т. е. при передаче информации от i -го сенсора к $(i + 1)$ -му сенсору P_i ($i = 1, \dots, K$). В дальнейшем предполагалось, что информация от сенсора к сенсору передается с помощью радиосигналов с фазовой манипуляцией. Как известно [18], если в канале присутствует только гауссовский белый шум, то искомая вероятность ошибки может быть найдена по формуле [14]

$$P_i = \Phi(-z_i),$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$ – интеграл

вероятностей [17]; $z_i = \frac{Z_0}{1 + \varepsilon d_i^\gamma}$ – отношение

сигнал/шум (ОСШ) для i -го локального сенсора (Z_0 – ОСШ на нулевом расстоянии от объекта наблюдения; ε – коэффициент пропорциональности, зависящий от рассматриваемых условий; d_i – расстояние от i -го сенсора до $(i + 1)$ -го сенсора; γ – коэффициент ослабления).

Таким образом, приведенные формулы (2), (4), (6) полностью определяют структуру синтезированных комплексных алгоритмов обнаружения, используемых как непосредственно в самих локальных сенсорах, так и при окончательном вынесении решения – в ЦУ. Эффективность обнаружения всей системы будем характеризовать минимальной вероятностью полной ошибки $P_{\Sigma_{\min}} = (\alpha_{\Sigma_{ЦУ}} + \beta_{\Sigma_{ЦУ}})/2$, достигаемой при некотором значении порога $h_{ЦУ}$. Исходя из приведенных формул (3), (5), (7), нетрудно заметить, что искомая вероятность полной ошибки зависит от количества сенсоров в сети, от ОСШ в каналах связи объекта, а также от координат объекта наблюдения.

Исследование эффективности комплексного алгоритма. Исследование эффективности разработанного комплексного алгоритма обнаружения, т. е. определение минимальной вероятности полной ошибки всей системы, выполнялось для различных условий наблюдения, отличающихся друг от друга количеством используемых сенсоров, ОСШ в каналах связи и местоположением объекта. Расчеты выполнялись при следующих предположениях: местоположение объекта априори известно; вероятность ложной тревоги для всех сенсоров одинакова и равна $\alpha = 10^{-1}$; вероятность пропуска сигнала для каждого сенсора, зависящая от расстояния до объекта, вычислялась по известным формулам [17, 18].

На рис. 2 показана зависимость $P_{\Sigma_{\min}}$ от количества сенсоров в сети при разных значениях ОСШ Z_0 . Предполагалось, что сенсоры расположены на прямой линии длиной $L = 40$ (в дальнейшем все числовые значения приводятся в некоторых безразмерных единицах). Координаты объекта наблюдения считались известными:

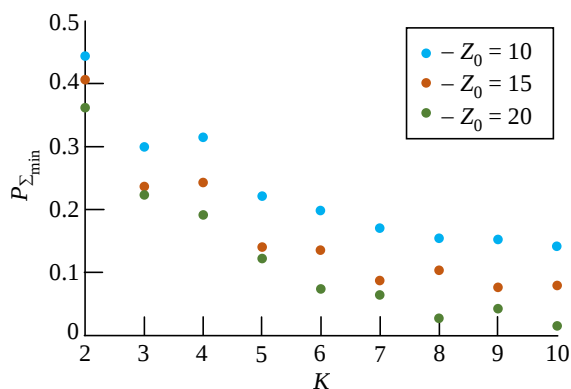


Рис. 2. Зависимость вероятности полной ошибки всей системы от K при разных значениях ОСШ

Fig. 2. Dependence of the total error probability of the entire system on K for different SNR values

$(x_0; y_0) = (20; 5)$; координаты ЦУ также предполагались известными и равными $(x_x; y_y) = (35; -3)$, т. е. объект находился примерно посередине, а ЦУ – ближе к краю (к последнему K -му сенсору) сети. Параметры $\varepsilon = 1, \gamma = 2$.

Из приведенных результатов следует, что вероятность полной ошибки в целом уменьшается с ростом количества сенсоров. Однако это уменьшение не плавное: в некоторых случаях вероятность полной ошибки может даже несколько возрасти при увеличении количества сенсоров, учитывая то, что при не очень большом количестве сенсоров на эффективность обнаружения достаточно сильно влияет их взаимное расположение относительно объекта наблюдения. Это расположение может зависеть от того, какое количество сенсоров имеется в сети: четное или нечетное. Увеличение количества сенсоров более 10...15 в рассматриваемых условиях нецелесообразно, так как не приводит к существенному уменьшению вероятности полной ошибки. Таким образом, рис. 2 позволяет определить необходимое количество сенсоров в сети для достижения заданной эффективности обнаружения в конкретных условиях наблюдения.

На рис. 3 показана зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ Z_0 при разном количестве сенсоров в сети K . Как и следовало ожидать, с увеличением ОСШ полная вероятность ошибки уменьшается. Причем степень влияния ОСШ на эффективность обнаружения разная для разного количества сенсоров в сети. Действительно, если $K = 3$, а ОСШ увеличивается с 10 до 20, то вероятность полной ошибки уменьшается всего

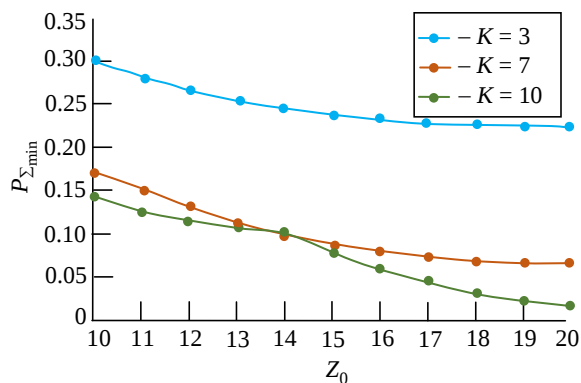


Рис. 3. Зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ при разных значениях K

Fig. 3. Dependence of the probability of total error on SNR for different values of K

в 1.25 раз. В то же время при $K = 10$ этот выигрыш увеличивается до 8 раз.

Далее было исследовано влияние местоположения объекта на эффективность его обнаружения. На рис. 4 приведена зависимость $P_{\Sigma min}(x_0)$ при $y_0 = 5, Z_0 = 20$ для разного количества сенсоров. Из рисунка можно сделать следующие выводы. Чем меньше сенсоров в сети, тем сильнее ощущается влияние координат объекта на эффективность его обнаружения, особенно если объект располагается достаточно близко к последнему K -му сенсору сети. При увеличении количества сенсоров в сети местоположение объекта начинает влиять на эффективность обнаружения не столь значительно. Следовательно, даже априорное незнание координат объекта при достаточно большом количестве используемых сенсоров (в рассматриваемых условиях, не менее 7) не препятствует применению разработанного алгоритма обнаружения.

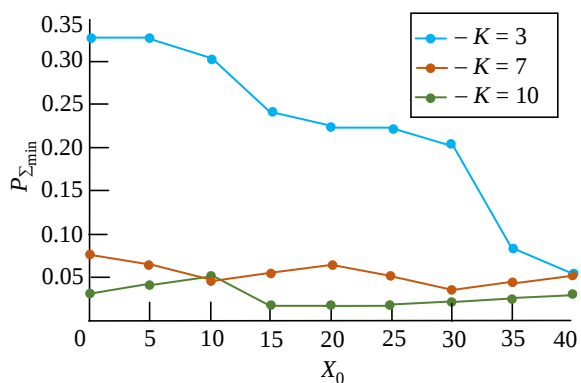


Рис. 4. Зависимость вероятности полной ошибки от местоположения объекта при разных значениях K в сети

Fig. 4. Dependence of the probability of total error on the location of the object for different values of K in the network

Представляет интерес сравнение эффективности обнаружения предложенного метода с методом, описанным в [16], а также с методом, основанным на применении радиальной топологии беспроводной сети (например, [12], [19]). Как отмечалось ранее, подход, изложенный в [16], основывается также на последовательной передаче информации от сенсора к сенсору. Однако информация, полученная от предыдущего сенсора, при этом дополнительно не обрабатывается, а просто добавляется к формируемому в данном сенсоре пакету. Сравнительный анализ эффективности обнаружения алгоритмов предлагаемого и изложенного в [16] свидетельствует о следующем. Эффективность предлагаемого алгоритма всегда, по крайней мере, не лучше эффективности алгоритма из [16]. Однако имеющийся проигрыш весьма незначителен: в рассматриваемых условиях вероятность полной ошибки может возрасти максимум в 5–7 раз, причем только при очень больших значениях ОСШ Z_0 и большом количестве сенсоров в сети (порядка 10 и более). В остальных случаях проигрыша либо вообще нет, либо он незначителен. Однако нельзя забывать, что предложенный алгоритм, как отмечалось ранее, существенно выигрывает с точки зрения увеличения энергетического ресурса сети (увеличения времени функционирования сети). Сравнение предложенного алгоритма с алгоритмом, основанным на применении радиальной архитектуры сети, свидетельствует о следующем. В одинаковых условиях, т. е. при одинаковых уровнях шумов в обоих случаях (что, кстати, не всегда возможно выполнить в реальных условиях), алгоритмы из [16] и [12]

обладают практически одинаковой эффективностью. Следовательно, приведенный вывод об энергетическом проигрыше разработанного алгоритма относительно известного (с радиальной архитектурой) остаются справедливыми и в данном случае. Опять же не следует забывать, что сеть с радиальной архитектурой не всегда может быть использована на практике в связи со сложным рельефом местности.

Заключение и выводы. В статье был выполнен статистический синтез и анализ алгоритма комплексного обнаружения объекта излучения в сети, содержащей некоторое количество измерительных сенсоров, осуществляющих комплексную обработку информации, поступающей от объекта и соседнего сенсора. Окончательное решение выносится в ЦУ на основе вынесенных решений в локальных сенсорах. Рассматривалась так называемая линейная топология сети, в которой информация передается последовательно от сенсора к сенсору. Получены точные (рекуррентные) выражения для характеристик, описывающих эффективность синтезированного комплексного алгоритма. Приведенные результаты исследования эффективности обнаружения синтезированным алгоритмом позволяют сделать обоснованный выбор параметров сети для достижения наилучшей эффективности обнаружения в заданных условиях. Возможными перспективными направлениями исследований являются исследования, связанные с влиянием на эффективность обнаружения каналов связи с замираниями и рассеянием, а также разработка комплексных алгоритмов обнаружения при неизвестных координатах цели [19].

Список литературы

1. Wireless Sensor Network as a Mesh: Vision and Challenges / Z. Nurlan, T. Zhukabayeva, M. Othman, A. Adamova, N. Zhakiyev // IEEE Access. 2021. Vol. 10. P. 46–67. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137341
2. Manuel E. M., Pankajakshan V., Mohan M. T. Efficient Strategies for Signal Aggregation in Low-Power Wireless Sensor Networks With Discrete Transmission Ranges // IEEE Sensors Letters. 2023. Vol. 7, iss. 3. Art. № 7500304. doi: 10.1109/LENS.2023.3250432
3. Hyun-Ho Choi, Sengly Muy, Jung-Ryun Lee. Geometric Analysis-Based Cluster Head Selection for Sectorized Wireless Powered Sensor Networks // IEEE Wireless

- Communications Letters. 2021. Vol. 10, iss. 3. P. 649–653. doi: 10.1109/LWC.2020.3044902
4. Marinescu D. C. Complex systems and clouds. A self-organization and self-management perspective. Amsterdam: Elsevier, 2017. 238 p.
5. Ye W., Heidemann J., Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks // Proc. of 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, USA, 23–27 June 2002. IEEE, 2002. Vol. 3. P. 1567–1576. doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019408
6. ZigBee Specification. ZigBee Alliance Std., 2007. URL: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf> (дата обращения 20.03.2025).

7. Adaptive Scale Patch-Based Contrast Measure for Dim and Small Infrared Target Detection / Z. Qiu, Y. Ma, F. Fan, J. Huang, M. Wu // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. Vol. 19. P. 1–5.
doi: 10.1109/LGRS.2020.3036842

8. Rao M., Kamila N. K. Target Tracking in Wireless Sensor Networks: The Current State of Art // Sensor Technology: Concepts, Methodologies, Tools and Applications. 2020. Vol. 2. P. 857–880.
doi: 10.4018/978-1-7998-2454-1.ch041

9. Amutha J., Sharma S., Nagar J. WSN Strategies Based on Sensors, Deployment, Sensing Models, Coverage and Energy Efficiency: Review, Approaches and Open Issues // Wireless Personal Communications. 2020. Vol. 111. P. 1089–1115.
doi: 10.1007/s11277-019-06903-z

10. Surenter I., Sridhar K. P., Roberts M. K. Maximizing energy efficiency in wireless sensor networks for data transmission: A Deep Learning-Based Grouping Model approach // Alexandria Engineering J. 2023. Vol. 83. P. 53–65.
doi: 10.1016/j.aej.2023.10.016

11. Nedham W. B., Al-Qurabat A. K. M. A Comprehensive review of clustering approaches for energy efficiency in wireless sensor networks // Int. J. of Computer Applications in Technology. 2023. Vol. 72, № 2. P. 139–160.
doi: 10.1504/IJCAT.2023.10058667

12. Парфенов В. И., Ле В. Д. Применение беспроводной сенсорной системы для охраны объектов с использованием датчиков инфракрасного излучения // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 3. С. 364–371.
doi: 10.18287/2412-6179-CO-788

13. Robustness of the Counting Rule for Distributed Detection in Wireless Sensor Network / A. Goel, A. Patel, K. G. Nagananda, P. K. Varshney // IEEE Signal Processing Letters. 2018. Vol. 25, iss. 8. P. 1191–1195.
doi: 10.1109/LSP.2018.2850529

14. Парфенов В. И., Ле В. Д. Беспроводные сенсорные сети. Принципы комплексирования информации от сенсоров при обнаружении объекта излучения. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 104 с.

15. ПСНТ 422–2020 (ИСО/МЭК 30128:2014) Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Сети сенсорные. Сетевой интерфейс прикладного программирования датчика / Утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 23.07.2020 № 31-пнст.

16. Парфенов В. И., Буй Ч. Т. Оптимальный алгоритм комплексного обнаружения целей в беспроводных сетях с "линейной" топологией // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXX Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2024. Т. 1. С. 276–285.

17. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.

18. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 1104 с.

19. Parfenov V. I., Le V. D. Optimal fusion rule for distributed detection with channel errors taking into account sensors' unreliability probability when protecting coastlines // Int. J. of Sensor Networks. 2022. Vol. 38, iss. 2. P. 71–84.
doi: 10.1504/IJNET.2022.121157

Информация об авторах

Парфенов Владимир Иванович – доктор физико-математических наук (2002), профессор (2009), профессор кафедры радиофизики Воронежского госуниверситета, профессор кафедры технической экспертизы и компьютерной безопасности Воронежского института МВД России, ведущий научный сотрудник концерна "Созвездие". Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – разработка и исследование эффективности алгоритмов обработки сигналов (стохастических, хаотических, оптических и пр.) на фоне помех с учетом особенностей их практического применения.

Адрес: Воронежский государственный университет, пл. Университетская, д. 1, Воронеж, 394018, Россия

E-mail: vip@phys.vsu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9815-5657>

Буй Чонг Тиен – инженер по специальности "Специальные радиотехнические системы" (2023, ВУНЦ ВВС Военно-воздушной академии им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина), аспирант физического факультета Воронежского государственного университета. Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – обработка сигналов на фоне помех с целью разработки алгоритмов для обнаружения целей; разведка.

Адрес: Воронежский государственный университет, пл. Университетская, д. 1, Воронеж, 394018, Россия

E-mail: trongtienpt98@gmail.com

References

1. Nurlan Z., Zhukabayeva T., Othman M., Adamova A., Zhakiyev N. Wireless Sensor Network as a Mesh: Vision and Challenges. IEEE Access. 2021, vol. 10, pp. 46–67.
doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137341

2. Manuel E. M., Pankajakshan V., Mohan M. T. Efficient Strategies for Signal Aggregation in Low-Power Wireless Sensor Networks With Discrete Trans-

mission Ranges. IEEE Sensors Letters. 2023, vol. 7, iss. 3, art. no. 7500304.

doi: 10.1109/LSSENS.2023.3250432

3. Hyun-Ho Choi, Sengly Muy, Jung-Ryun Lee. Geometric Analysis-Based Cluster Head Selection for Sectorized Wireless Powered Sensor Networks. IEEE Wireless Communications Letters. 2021, vol. 10, iss. 3, pp. 649–653.
doi: 10.1109/LWC.2020.3044902

4. Marinescu D. C. Complex Systems and Clouds. A self-Organization and Self-Management Perspective. Amsterdam, Elsevier, 2017, 238 p.
5. Ye W., Heidemann J., Estrin D. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. Proc. of 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, USA, 23–27 June 2002. IEEE, 2002, vol. 3, pp. 1567–1576. doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019408
6. ZigBee Specification. ZigBee Alliance Std., 2007. Available at: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf> (accessed 20.03.2025).
7. Qiu Z., Ma Y., Fan F., Huang J., Wu M. Adaptive Scale Patch-Based Contrast Measure for Dim and Small Infrared Target Detection. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022, vol. 19, pp. 1–5. doi: 10.1109/LGRS.2020.3036842
8. Rao M., Kamila N. K. Target Tracking in Wireless Sensor Networks: The Current State of Art. Sensor Technology: Concepts, Methodologies, Tools and Applications. 2020, vol. 2, pp. 857–880. doi: 10.4018/978-1-7998-2454-1.ch041
9. Amutha J., Sharma S., Nagar J. WSN Strategies Based on Sensors, Deployment, Sensing Models, Coverage and Energy Efficiency: Review, Approaches and Open Issues. Wireless Personal Communications. 2020, vol. 111, pp. 1089–1115. doi: 10.1007/s11277-019-06903-z
10. Surenter I., Sridhar K. P., Roberts M. K. Maximizing Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks for Data Transmission: A Deep Learning-Based Grouping Model approach. Alexandria Engineering J. 2023, vol. 83, pp. 53–65. doi: 10.1016/j.aej.2023.10.016
11. Nedham W. B., Al-Qurabat A. K. M. A Comprehensive Review of Clustering Approaches for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks. Int. J. of Computer Applications in Technology. 2023, vol. 72, no. 2, pp. 139–160. doi: 10.1504/IJCAT.2023.10058667
12. Parfenov V. I., Le V. D. Application of a Wireless Sensor System for Object Protection Using Infra-red Sensors. Computer Optics. 2021, vol. 45, no. 3, pp. 364–371. (In Russ.) doi: 10.18287/2412-6179-CO-788
13. Goel A., Patel A., Nagananda K. G., Varshney P. K. Robustness of the Counting Rule for Distributed Detection in Wireless Sensor Network. IEEE Signal Processing Letters. 2018, vol. 25, iss. 8, pp. 1191–1195. doi: 10.1109/LSP.2018.2850529
14. Parfenov V. I., Le V. D. *Besprovodnye sensornye seti. Principy kompleksirovaniya informacii ot sensorov pri obnaruzhenii ob'ekta izlucheniya* [Wireless Sensor Networks. Principles of Collecting Information from Sensors When Detecting a Radiation Object]. Moscow, Vologda, *Infra-Inzheneriya*, 2025, 104 p. (In Russ.)
15. PSNT 422–2020 (ISO/MEK 30128:2014) *Predvaritel'nyj nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Informacionnye tehnologii. Seti sensornye. Setevoj interfejs prikladnogo programmirovaniya datchika. (utv. I vveden v dejstvie Prikazom Rosstandarta ot 23.07.2020 no. 31-pnst).* [Preliminary National Standard of the Russian Federation. Information Technologies. Sensor Networks. Sensor Application Programming Network Interface]. (In Russ.)
16. Parfenov V. I., Bui T. T. *Optimal'nyi algoritm kompleksnogo obnaruzheniya tselei v besprovodnykh setyakh s "lineinoi" topologiei* [Optimal Algorithm for Comprehensive Target Detection in Wireless Sensor Networks with "Linear" Topology]. *Radiolokacija, navigacija, svjaz': sb. tr. XXX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Voronezh, Izd-vo VGU*, 2024, vol. 1, pp. 276–285. (In Russ.)
17. Tihonov V. I. *Optimal'nyj priem signalov* [Optimal Signal Reception]. Moscow, *Radio i svjaz'*, 1983, 320 p. (In Russ.)
18. Skljär B. *Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital Communications. Theoretical Foundations and Practical Applications]. Moscow, *Vil'jams*, 2004, 1104 p. (In Russ.)
19. Parfenov V. I., Le V. D. Optimal Fusion Rule for Distributed Detection with Channel Errors Taking into Account Sensors' Unreliability Probability When Protecting Coastlines. Int. J. of Sensor Networks. 2022, vol. 38, iss. 2, pp. 71–84. doi: 10.1504/IJSNET.2022.121157

Information about the authors

Vladimir I. Parfenov, Dr Sci. (Eng.) (2002), Professor (2009), Professor of the Department of Radiophysics of Voronezh State University, Professor of the Department of Technical Expertise and Computer Security of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, senior researcher at the Sozvezdie Concern. he author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: development and research of the effectiveness of signal processing algorithms (stochastic, chaotic, optical, etc.) against a background of interference, taking into account the features of their practical application.

Address: Voronezh State University, 1, Universitetskaya Sq., Voronezh 1394018, Russia

E-mail: vip@phys.vsu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9815-5657>

Bui Trong Tien, Engineer specializing in "Special radio engineering systems" (2023, Military Training and Research Center of the Air Force of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy), Postgraduate student of Faculty of Physics of Voronezh State University. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: signal processing against a background of interference in order to develop algorithms for target detection; reconnaissance.

Address: Voronezh State University, 1, Universitetskaya Sq., Voronezh 1394018, Russia

E-mail: trongtienpt98@gmail.com

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-2-45-56>

Анализ классификационных признаков объектов военной техники набора MSTAR, выявляемых глубокой сверточной нейронной сетью в процессе обучения

И. Ф. Купряшкин

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия
им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия

✉ ifk78@mail.ru

Аннотация

Введение. Одним из наиболее эффективных инструментов для решения задачи классификации отметок объектов на радиолокационных изображениях являются нейронные сети. Однако процесс принятия ими решения непрозрачен, в связи с чем определение классификационных признаков объектов, вносящих существенный вклад в результат работы сети, – актуальная задача, составляющая часть общей проблемы "объяснимого искусственного интеллекта".

Цель работы. Определение классификационных признаков объектов военной техники, выявляемых глубокой сверточной нейронной сетью в процессе обучения.

Материалы и методы. Обучение и тестирование нейронной сети осуществлено с использованием фреймворков Keras и Tensorflow 2.0. В качестве датасета использована открытая часть набора радиолокационных изображений MSTAR. Для определения классификационных признаков использован метод GradCAM.

Результаты. В случае изображений с неподавленным фоном собственно отметка объекта вносит определяющий вклад в результат классификации только для 58 % изображений, для 6 % результат в основном обусловлен радиолокационной тенью объекта, а для 25 % – фоном местности. Для 11 % изображений наиболее выраженный классификационный признак установить не удалось. Для изображений с подавленным фоном результат классификации обусловлен распределением яркости в пределах отметки примерно в 60 % случаев, а ее контуром – в 40 % случаев.

Заключение. Особенность набора MSTAR в том, что каждый класс представлен набором изображений одного и того же реального объекта при различных ракурсах съемки. Следствием этого являются локальные особенности фона, не заметные для человека, уникальные для каждого класса объектов и способные внести определяющий вклад в результат обучения нейронной сети. Показано, что подавление фона и снижение разности изображений устраняет этот эффект. Из полученных результатов также следует целесообразность проведения дальнейших исследований возможностей методов ХАИ применительно к современным нейросетевым детекторам и датасетам радиолокационных изображений.

Ключевые слова: глубокая сверточная нейронная сеть, радиолокационное изображение, классификационный признак

Для цитирования: Купряшкин И. Ф. Анализ классификационных признаков объектов военной техники набора MSTAR, выявляемых глубокой сверточной нейронной сетью в процессе обучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 45–56.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-45-56

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 24.10.2024; принята к публикации после рецензирования 16.03.2025; опубликована онлайн 30.04.2025



Analysis of MSTAR Object Classification Features Extracted by a Deep Convolutional Neural Network

Ivan F. Kupryashkin

Military Educational and Scientific Center of the Air Force
"N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia

✉ ifk78@mail.ru

Abstract

Introduction. Deep convolutional neural networks are effective tools for classifying objects on radar images; however, their decision-making process is not transparent. This makes the determination of classification features of objects that affect the entire network operation a relevant research task. Such a study contributes to the field of explainable AI (XAI).

Aim. Determination of the classification features of military objects, detected by a deep convolutional neural network during training.

Materials and methods. The convolutional neural network was designed, trained, and tested using Keras and Tensorflow 2.0 libraries on the open part of the MSTAR dataset. The GradCAM method was used to visualize and determine the classification features of objects in the dataset.

Results. When using MSTAR images with an unsuppressed background, the object itself makes a significant contribution to the classification result only for 58 % of the images. For 6 % of the images, the classification result is determined by the object radar shadow, and for 25 % of images – by the background. For 11 % of the images, the most significant classification feature could not be established. For images with a suppressed background, in 60 and 40 % of the cases, brightness distribution and the object contour, respectively, made the main contribution to the classification result.

Conclusion. In the MSTAR dataset, each class of objects is represented by a set of radar images of the same real object from different view angles. This determines local background features, invisible to humans and unique to each class of objects. These features have a significant effect of the training outcome of the neural network. This effect can be eliminated by suppressing the background and reducing the image dimensionality. The obtained results also suggest the feasibility of further research into the XAI capabilities in relation to modern neural detectors and radar image datasets.

Keywords: deep convolutional neural network, radar image, classification feature

For citation: Kupryashkin I. F. Analysis of MSTAR Object Classification Features Extracted by a Deep Convolutional Neural Network. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 45–56.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-45-56

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 24.10.2024; accepted 16.03.2025; published online 30.04.2025

Введение. Современные нейросетевые решения вызывают значительный интерес у разработчиков систем автоматического дешифрирования радиолокационных изображений (РЛИ) благодаря высоким результатам, демонстрируемым ими при решении задач поиска и классификации отметок объектов, сегментации изображений, подавления спекл-шума и др. [1–7].

Несмотря на это, неясное понимание процесса принятия решения, непрозрачность рабо-

ты нейронных сетей, их уязвимость к adversarial-атакам являются существенным препятствием на пути внедрения нейросетевых технологий в ряде областей [8]. Все это – часть более общей проблемы "объяснимого искусственного интеллекта" (XAI – eXplainable AI) [8], причем решения, принимаемые нейронными сетями, считаются самыми точными и одновременно – самыми непрозрачными по сравнению с остальными алгоритмами машинного обуче-

ния. На сегодняшний день существует ряд систем ХАИ от IBM, Microsoft, Google и др., включающих различные инструменты исследования и визуализации процесса и результатов работы нейросетей.

Однако в случае РЛИ необходимо отметить относительно малое количество публикаций, посвященных вопросам применения методов ХАИ к нейросетевым классификаторам или детекторам [9–12]. Учитывая недостаточную изученность этого направления, представляется целесообразным провести исследование хотя бы на примере простой глубокой сверточной нейронной сети (ГСНС). Безусловно, на практике при поиске объектов на крупномасштабных снимках в "чистом" виде они не применяются, так как уже несколько лет существуют быстродействующие решения, основанные на более продвинутых архитектурах [3–7]. Однако учитывая неочевидный характер работы нейронных сетей, особенно со сложной архитектурой, и сложность проблемы ХАИ в целом, более рациональным представляется проведение исследования по принципу "от простого к сложному", т. е. изучение на начальном этапе более простого и интуитивно понятного инструмента – ГСНС.

Что касается выбора данных, то на сегодняшний день в открытом доступе существует достаточно большое количество наборов РЛИ земной и морской поверхности, предназначенных для обучения и тестирования нейросетевых детекторов с целью их дальнейшего практического использования. Многие из них, в силу относительной доступности снимков и простоты разметки, являются наборами изображений судов на морской поверхности (HRSID, LS-SSDD, OpenSARShip, SAR-Ship и др.), сформированными на основе космической съемки такими РЛС, как Radarsat-2, Sentinel-1, TerraSAR-X, Gaofen-3 [7]. Следует также выделить крупный набор SARDet-100K, скомпилированный из других датасетов, в том числе и некоторых из перечисленных выше, и включающий 116 598 изображений, на которых представлены 245 653 объекта шести классов: танк, самолет, корабль, автомобиль, мост и гавань [13]. Однако в случае настолько сильно отличающихся размерами и формой объектов, как

танк, мост или гавань, определение классификационных признаков не представляет особого интереса. Более важным представляется изучение особенностей, выделяемых нейросетями в случае классификации объектов, близких по виду своих отметок. Например, объектов различных типов, но принадлежащих к какому-то общему классу (самолеты, объекты авто- и бронетехники, морские суда с сопоставимым водоизмещением и т. п.). Кроме того, общая черта перечисленных наборов – их формирование из РЛИ, имеющихся в открытом доступе и полученных с использованием различных датчиков, в разное время, в различных частотных диапазонах и с различным разрешением [7]. С одной стороны, это снижает риск переобучения детектора и способствует достижению его инвариантности к условиям формирования РЛИ и типу РЛС, но, с другой стороны, существенно затрудняет определение тонких отличий изображений объектов близких классов. Последнее особенно важно в случаях, когда датасет формируется в интересах обучения нейросетевых систем обработки высокодетальных снимков РЛС конкретного диапазона длин волн или даже типа.

В связи с изложенным целесообразно использовать широко известную открытую часть базового набора MSTAR (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) [14]. Он включает РЛИ X-диапазона десяти образцов военной и специальной техники и отличается от большинства более современных наборов (например, OGSOD или SIVED [7]) качественной сбалансированностью, полным охватом азимутальных ракурсов съемки объектов с угловым шагом до двух градусов и высоким разрешением порядка 0.3 м. Такое высокое пространственное разрешение особенно важно, так как именно к этому уровню сегодня приблизились передовые космические системы радиолокационной съемки (Umbra, Capella, Iceye). Все это следствие изначальной цели его создания как банка высокодетальных радиолокационных отметок военной техники для исследования возможностей существующих и отработки новых алгоритмических решений по их детектированию, классификации и др. Несмотря на то, что с момента формирования этого набо-

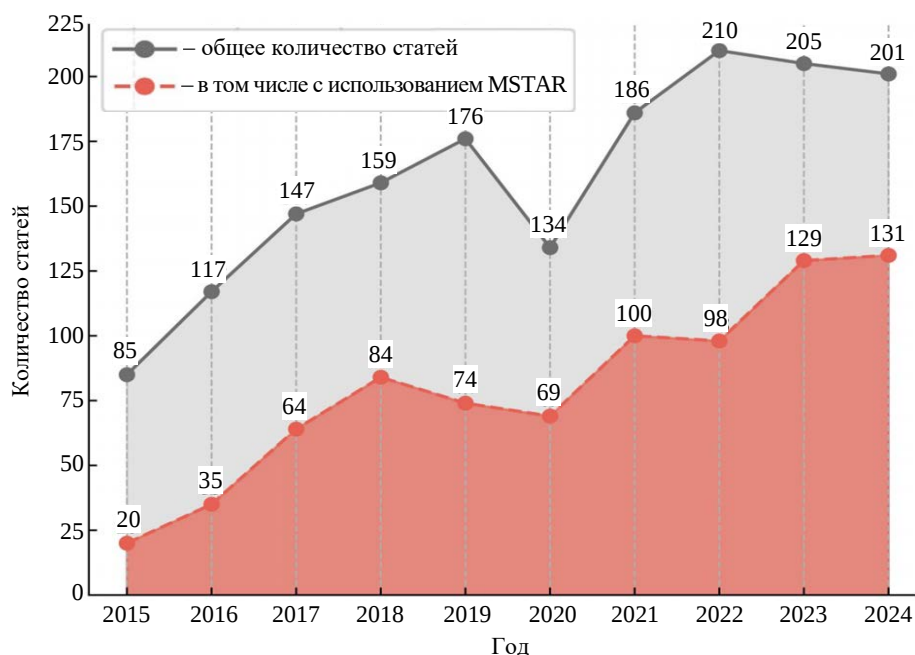


Рис. 1. Количество публикаций по вопросам распознавания объектов на РЛИ по годам (2015–2024)

Fig. 1. Number of publications on the SAR ATR issues by year (2015–2024)

ра прошло уже почти 30 лет, на сегодняшний день в открытом доступе до сих пор отсутствуют банки РЛИ военной техники, сопоставимые по детальности и диапазону пространственных условий съемки с набором MSTAR. На рис. 1 приведена диаграмма [15], иллюстрирующая динамику роста по годам общего количества статей, посвященных вопросам распознавания объектов на РЛИ, и в том числе статей, в которых обсуждаемые решения так или иначе используют набор MSTAR.

В случае ГСНС, предназначенных для обработки изображений, часто применяется визуализация шаблонов максимальной активации фильтров сверточных слоев [16, 17], или так называемых карт активации классов (Class Activation Map – CAM), или тепловых карт, наглядно показывающих, какие области изображения в наибольшей степени повлияли на решение, принятое сетью [9–12, 17, 18].

В связи с этим представляет интерес дальнейшее изучение особенностей набора MSTAR методом GradCAM с целью определения классификационных признаков изображений объектов военной техники, выявляемых ГСНС в процессе обучения.

Методы. В качестве исходных данных использован набор MSTAR, из всех имеющихся изображений которого сформированы обучающий, проверочный и тестовый наборы, сведения об объемах (количестве изображений) которых приведены в табл. 1 [19]. Изображения объектов обучающих и проверочных наборов получены при съемке с углом визирования 17° , тестовых наборов – 15° .

Общее количество изображений обучающего, проверочного и тестового наборов составляет 1923, 891 и 2503 соответственно. В первом случае фон на изображениях не подавлялся, размерность изображений объектов, различная

Табл. 1. Объемы обучающих, проверочных и тестовых наборов

Tab. 1. Volumes of training, validation and test sets

Набор	Объекты									
	2C1	БМП-2	D7	T-62	БРДМ-2	БТР-60	БТР-70	T-72	Зил-131	ЗСУ-23-4
Обучающий	209	163	200	200	209	179	163	200	200	200
Проверочный	90	70	99	99	89	77	70	79	99	99
Тестовый	274	195	274	273	274	195	196	274	274	274

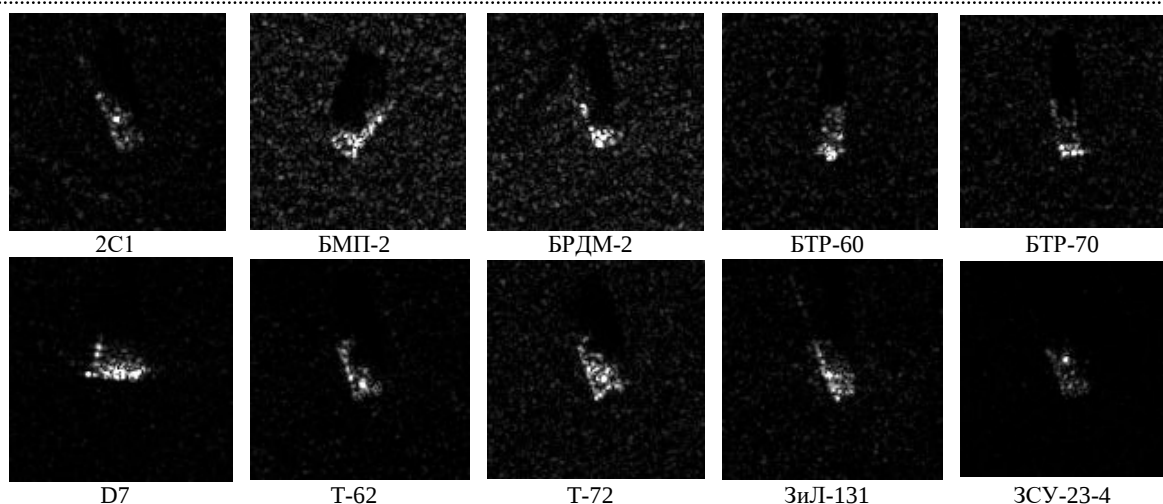


Рис. 2. Радиолокационные изображения объектов набора MSTAR

Fig. 2. Radar images of MSTAR dataset objects

в исходном наборе для разных классов и составляющая от 128×128 пикселей и более, приводилась к одинаковой для всех классов (120×120 пикселей) за счет "обрезки" изображений по краям. Изображения представлены в форме массивов комплексных отсчетов, поэтому предварительная обработка каждого из них включает преобразование в целочисленный 8-битный формат и нормировку по максимальному значению.

Примеры полученных радиолокационных изображений объектов приведены на рис. 2.

Разработка и обучение сети осуществлялись с использованием библиотеки глубокого обучения Keras [17] и фреймворка TensorFlow 2.0. Архитектура сети показана на рис. 3, общее количество ее настраиваемых параметров составляет 9 729 258. В качестве оптимизатора применяется алгоритм Adam с параметром скорости обучения 10^{-4} , в качестве функции потерь – перекрестная энтропия. Обучение осуществляется в течение двухсот эпох, и его общее время с использованием GPU (GeForce GTX1650) составляет около 15 мин, т. е. по 4...5 с на эпоху. В качестве дополнительного приема предотвращения переобучения применяется расширение данных посредством смещения каждого изображения по вертикали и горизонтали на случайное число пикселей от одного до пяти.

В [19] было показано, что фон местности, на которой расположены объекты, способен весьма существенно повлиять на результат ра-



Рис. 3. Архитектура нейронной сети

Fig. 3. Neural network architecture

боты нейронной сети. Так, ГСНС способна правильно классифицировать практически 50 % изображений даже в том случае, когда отметки собственно объектов и их радиолокационных теней полностью режектированы [19]. В связи с этим обучение и анализ осуществлялись для двух типов наборов изображений – с неподавленным фоном (рис. 2) и с подавленным фоном и пониженной до 44×44 пикселей размерностью (рис. 4). Подавление фона осуществлялось методом пороговой обработки, как описано в [19].

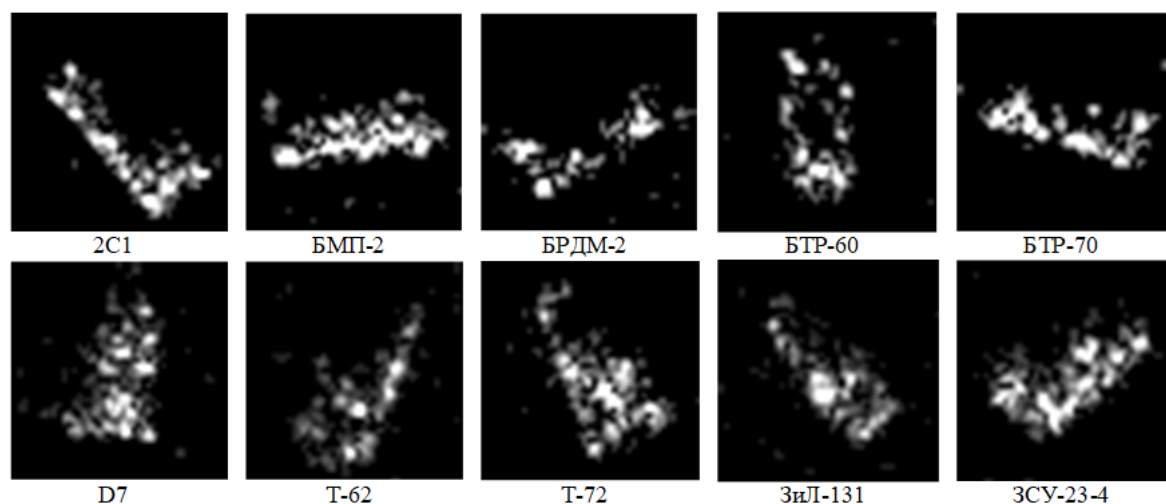


Рис. 4. Примеры изображений набора MSTAR с подавленным фоном

Fig. 4. MSTAR images with suppressed background

По результатам классификации изображений тестового набора с неподавленным фоном достигнутая точность составила 95.71 %, с подавленным фоном и пониженной размерностью – 97.2 %.

Следует отметить, что задача исследования – достигнуть не максимально возможной, а всего лишь достаточно хорошей точности сети для последующего анализа работы. Поэтому использовалась классическая архитектура VGG-типа [17, 20], а тщательный подбор гиперпараметров, направленный на повышение точности классификации, не проводился.

После обучения изображения тестового набора поочередно подавались на вход сети для определения их тепловых карт методом GradCAM [17, 18]. Метод GradCAM предполагает вычисление градиентов для класса, к которому сеть отнесла изображение, по отношению к последнему сверточному слою, усреднение градиентов для каждой карты признаков на выходе этого слоя, перемножение средних градиентов с картами признаков и суммирование результатов перемножения. RGB-отсчеты полученной тепловой карты с весом 0.4 суммировались с соответствующими отсчетами тестового изображения. Так как исходное тестовое изображение является 8-битным одноканальным, т. е. представлено в градациях серого, перед суммированием с тепловой картой оно преобразовывалось в трехканальное RGB-изображение с одинаковыми интенсивностями пикселей в каждом цветовом канале.

Результаты. Из результатов, полученных для набора изображений с неподавленным фоном, следует, что основными классификационными признаками могут являться распределение интенсивности отсчетов в пределах отметки объекта, т. е. собственно ее вид, очертания радиолокационной тени объекта, а в значительном числе случаев – фон окружающей местности. Для отдельных изображений полученные тепловые карты являются однородными, что не позволило установить наиболее существенные классификационные признаки в этих случаях.

На рис. 5 приведены примеры тепловых карт изображений объектов для случаев, когда наибольший вклад в решение сети о классе объекта внес фон местности.

На рис. 6 представлены примеры изображений в случаях, когда определяющим признаком для сети является вид радиолокационной тени объекта. При этом информативным может быть как сам участок тени, так и ее контур (БРДМ-2, ЗиЛ-131). В случае бульдозера D7 изображения, на которых тепловая карта соответствовала бы его тени, отсутствуют. Объекты данного класса вообще заметно отличаются от всех остальных характерным видом и размерами отметки, поэтому, скорее всего, сети просто незачем "учиться" использовать дополнительные фоновые признаки.

На рис. 7 приведены примеры изображений для случаев, когда существенный вклад в решение сети внесла собственно отметка объекта.

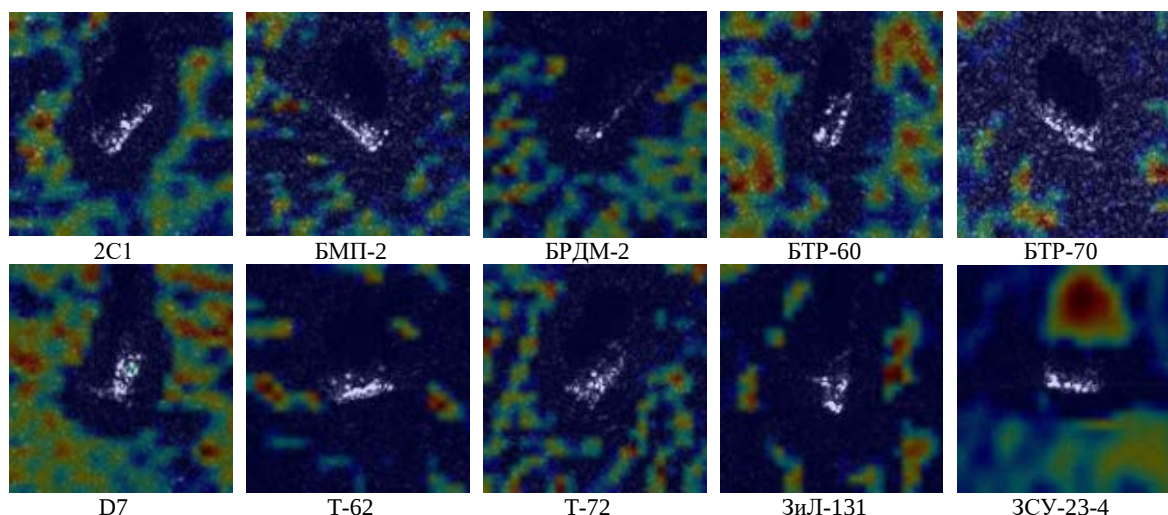


Рис. 5. Примеры тепловых карт изображений, для которых наиболее существенным классификационным признаком явился фон местности
Fig. 5. Heatmaps of images, for which the terrain background was the most significant classification feature

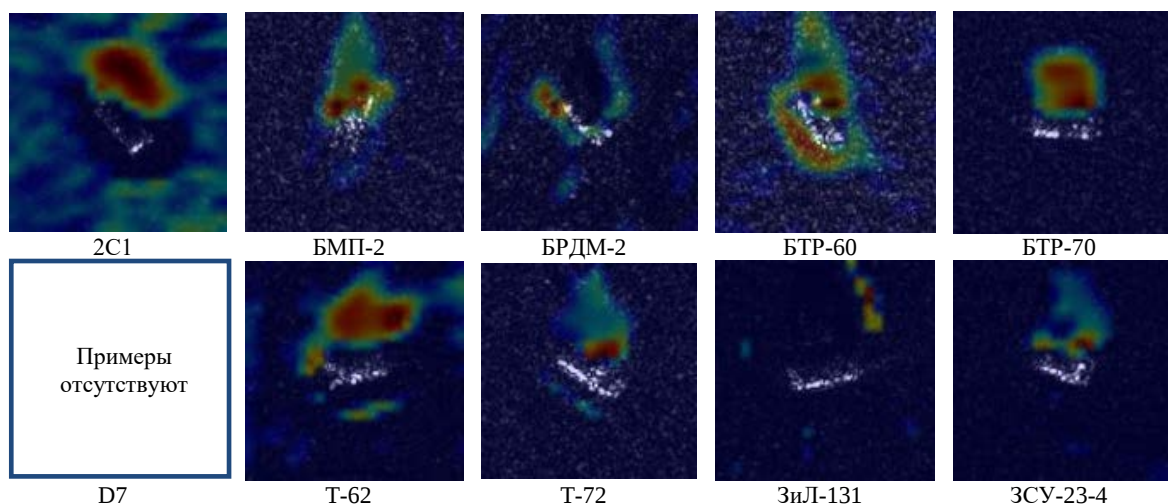


Рис. 6. Примеры тепловых карт изображений, для которых наиболее существенным классификационным признаком явилась радиолокационная тень объекта
Fig. 6. Heatmaps of images, for which the object shadow was the most significant classification feature

Кроме того, на рис. 8 приведены примеры неверно классифицированных изображений объектов. По их виду невозможно однозначно определить причину ошибочного результата, так как используются все классификационные признаки (вид отметки, тень и окружающий фон).

Распределение изображений тестового набора по наиболее выраженным классификационным признакам приведено в табл. 2. Эти оценки не лишены определенного субъективизма, так как не во всех случаях можно однозначно выделить конкретный доминирующий классификационный признак. Например, в ряде

случаев отметка и самого объекта, и его радиолокационной тени совместно вносят заметный вклад в решение сети.

Из данных табл. 2 следует, что собственно отметка объекта вносила основной вклад в 57.5 % изображений, т. е. всего лишь чуть больше, чем в половине случаев. Это приблизительно соответствует результату, полученному в [19], когда даже при полностью режестрированных отметках объектов точность классификации изображений составила не около 10 %, как этого можно было бы ожидать при 10 классах, а 50.72 %.

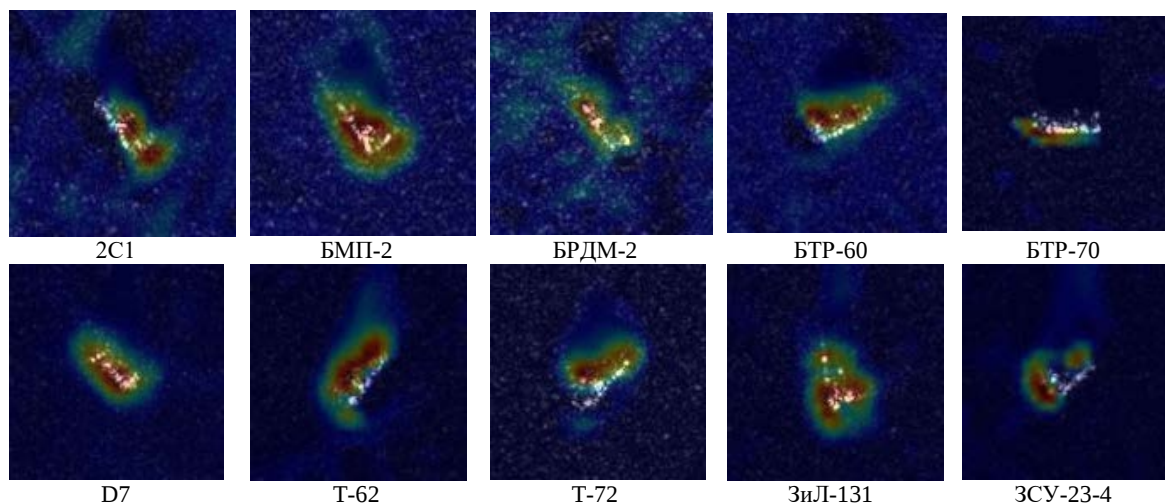


Рис. 7. Примеры тепловых карт изображений, для которых наиболее существенным классификационным признаком явился собственно вид отметки объекта

Fig. 7. Heatmaps of images, for which the object itself was the most significant classification feature

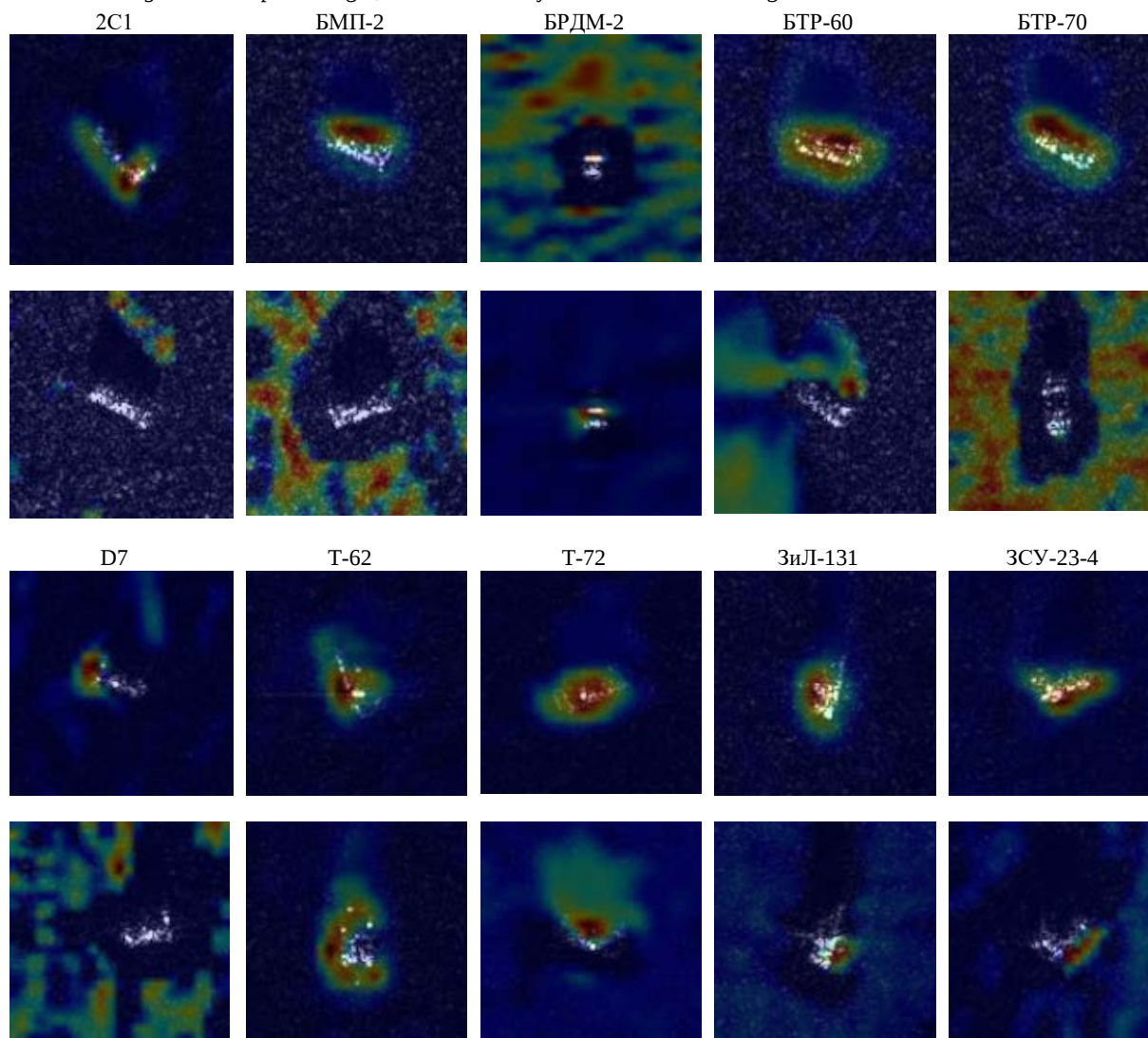


Рис. 8. Примеры тепловых карт ошибочно классифицированных изображений

Fig. 8. Heatmaps for misclassified images

Табл. 2. Распределение изображений тестового набора по наиболее выраженным классификационным признакам
Tab. 2. Distribution of test set images according to the most significant classification features

Наиболее выраженный классификационный признак	2С1	БМП-2	БРДМ-2	БТР-60	БТР-70	Д7	Т-62	Т-72	Зил-131	ЗСУ-23-4	Всего	Доля от общего объема тестового набора (2503), %
Отметка	150	155	43	96	36	260	179	194	76	251	1440	57.5
Тень	18	11	1	9	18	–	43	29	2	18	149	6.0
Фон	100	27	230	67	29	14	14	36	97	2	616	24.6
Не установлен	6	2	–	23	113	–	37	15	99	3	298	11.9
Всего	274	195	274	195	196	274	273	274	274	274	2503	100

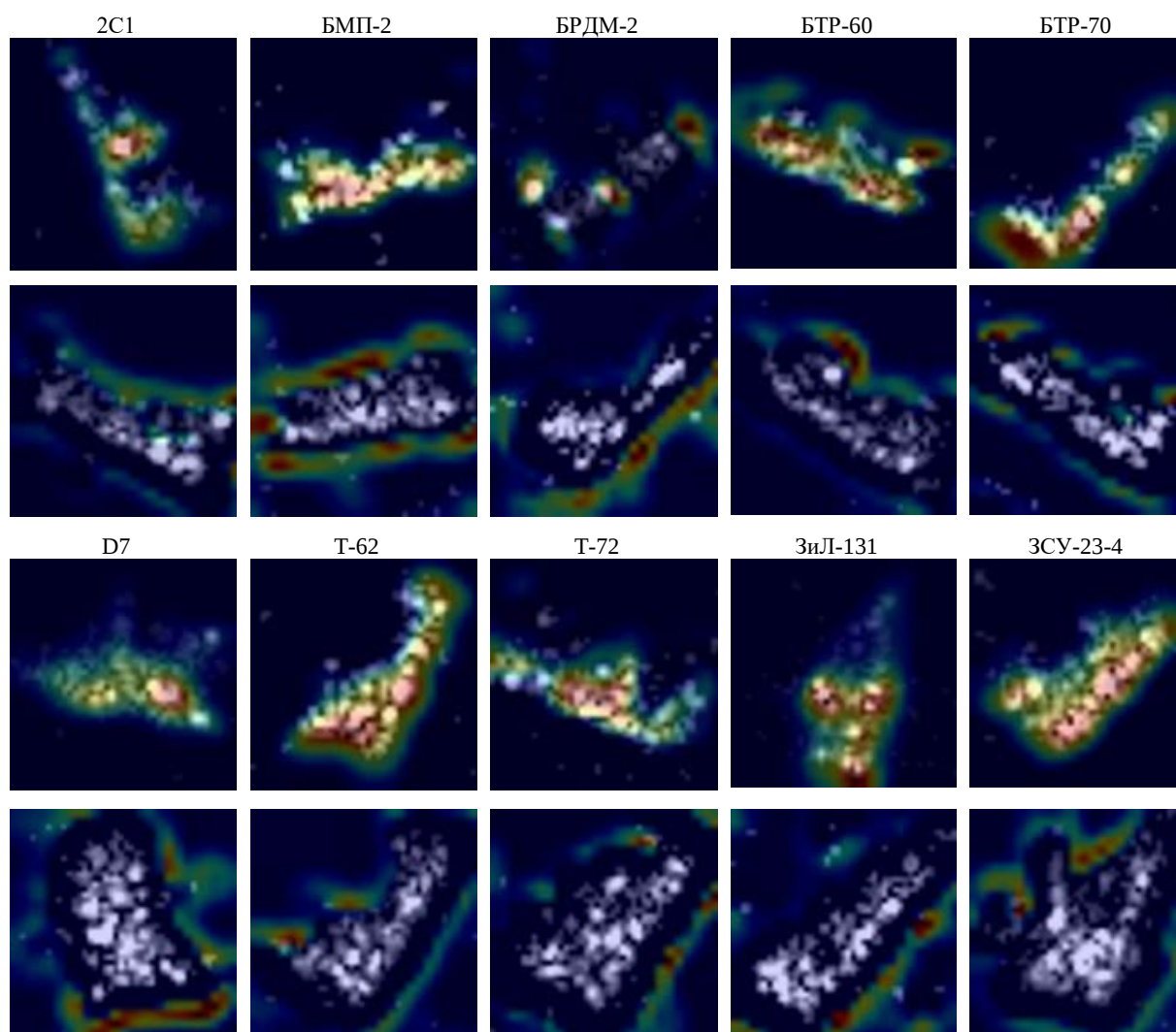


Рис. 9. Примеры тепловых карт изображений объектов набора MSTAR с подавленным фоном

Fig. 9. Heatmaps of MSTAR images with suppressed background

Аналогичным образом осуществлялся расчет тепловых карт для тестового набора изображений с подавленным фоном и сниженной размерностью. Из анализа их вида следует, что основным классификационным признаком в

этом случае является или распределение интенсивности отсчетов в пределах самой отметки (примерно 60 % изображений), или вид ее контура (около 40 % изображений). Примеры изображений приведены на рис. 9, характери-

Табл. 3. Распределение изображений тестового набора с подавленным фоном по наиболее выраженным классификационным признакам

Tab. 3. Distribution of test set images with suppressed background according to the most significant classification features

Наиболее выраженный классификационный признак	2С1	БМП-2	БРДМ-2	БТР-60	БТР-70	D7	T-62	T-72	Зил-131	ЗСУ-23-4	Всего	Доля от общего объема тестового набора (500), %
Отметка	39	5	15	45	27	29	46	26	27	42	301	60.2
Контур	11	45	35	5	23	21	4	24	23	8	188	39.8
Всего	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	500	100

стика их распределения по наиболее выраженным классификационным признакам – в табл. 3.

Заключение. В ходе обучения классификации РЛИ объектов военной техники ГСНС ожидаемо демонстрирует характерную для нейросетей вообще "склонность" к переобучению, т. е. использованию всех скрытых закономерностей в данных, даже если они не имеют прямого отношения к решаемой задаче. В случае широко используемого базового набора MSTAR в роли такой закономерности часто выступают практически незаметные особенности фона местности, на которой расположены объекты того или иного класса (до 25 % изображений тестового набора). Также необходимо отметить, что в отдельных случаях (около 6 % изображений) определяющую роль для результата классификации играет радиолокационная тень объекта. Тем не менее, основным классификационным признаком остается распределение интенсивности в пределах отметки (около 58 % изображений от общего объема тестового набора).

Подавление фона и снижение размерности ("обрезка") изображений позволили исключить влияние местности и тени на результат работы сети. Установлено, что в этом случае примерно для 60 % изображений определяющим признаком явилось распределение интенсивности в пределах отметки, а для 40 % – вид ее контура. Определить более конкретно, какие устойчивые к поворотам особенности отметок объектов каждого класса являются информативными для сети, с помощью метода GradCAM не удалось. Скорее всего, это объективно обусловлено довольно близким сходством вида отметок объектов разных классов (за исключением D7 и ЗСУ-23-4), а также характерным для РЛИ спекл-шумом.

Приблизительно для 11 % изображений тестового набора метод GradCAM не позволил

сформировать информативные тепловые карты, что оставляет работу сети в значительной степени непрозрачной. Таким образом, даже в случае такого сбалансированного, продолжительно используемого и хорошо изученного набора, как MSTAR, требуется повышенное внимание к устранению скрытых закономерностей в данных перед их подачей на вход нейронной сети. В качестве рекомендации по предварительной подготовке изображений набора MSTAR предлагается включение процедуры подавления фона местности и снижение их размерности (с минимальной для отдельных классов 128×128 до одинаковой для всех классов 44×44).

Так как в статье рассмотрена только ГСНС с классической архитектурой VGG-типа, полученные результаты в части процентных соотношений вклада того или иного признака в результат классификации при использовании других, более современных архитектур (трансформеров, диффузионных моделей и др.), могут измениться. Оценки этих вкладов, очевидно, изменятся и в случае использования наборов РЛИ объектов другого класса (например, морских судов, самолетов, зданий и сооружений), или РЛИ с более низким разрешением, или полученных в другом частотном диапазоне.

В любом случае, из рассмотренного примера следует, что применение к РЛИ даже такого базового метода XAI, как GradCAM, позволяет уточнить особенности принятия решения нейронной сетью и на их основе сформулировать рекомендации по предварительной подготовке данных. Безусловно, значительный интерес представляет дальнейшее изучение возможностей и других методов XAI (SHAP, LIME, CEM и др.) по объяснению решений нейросетей, в том числе на более объемных и разнообразных наборах данных и для передовых современных архитектур.

Список литературы

1. Deep Learning Meets SAR / X. Zhu, S. Montazeri, M. Ali, Yu. Hua, Yu. Wang, L. Mou, Yi. Shi, F. Xu, R. Bamler. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.10027> (дата обращения 10.03.2025).
2. Deep Learning for SAR Image Classification / H. Anas, H. Majdoulayne, A. Chaimae, S. M. Nabil // Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 1037. Cham: Springer, 2020. P. 890–898. doi: 10.1007/978-3-030-29516-5_67
3. Deep Learning for SAR Ship Detection: Past, Present and Future / J. Li, C. Xu, H. Su, L. Gao, T. Wang // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 11. Art. № 2712. doi: 10.3390/rs14112712
4. Target Detection and Recognition in Synthetic Aperture Radar Images Using YOLO Deep Learning Methods / Wu T.-D., Wang H.-F., Hsu P.-H., Tiong K.-K., Chang L.-C., Chang C.-H. // Intern. Conf. on Consumer Electronics, PingTung, Taiwan, 17–19 July 2023. IEEE, 2023. P. 593–594. doi: 10.1109/ICCE-Taiwan58799.2023.10226736
5. Yu C., Shin Y. SMEP-DETR: Transformer-Based Ship Detection for SAR Imagery with Multi-Edge Enhancement and Parallel Dilated Convolutions // Remote Sensing. 2025. Vol. 17, iss. 6. Art. № 953. doi: 10.3390/rs17060953
6. A Ship Detection Method via Redesigned FCOS in Large-Scale SAR Images / M. Zhu, G. Hu, H. Zhou, S. Wang, Z. Feng, S. Yue // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 5. Art. № 1153. doi: 10.3390/rs14051153
7. SARATR-X: A Foundation Model for Synthetic Aperture Radar Images Target Recognition / W. Li, W. Yang, Y. Hou, L. Liu, X. Li, X. Li. URL: <https://arxiv.org/html/2405.09365v1> (дата обращения 10.03.2025).
8. Мишра П. Объяснимые модели искусственного интеллекта на Python. Модель искусственного интеллекта. Объяснения с использованием библиотек, расширений и фреймворков на основе языка Python. М.: ДМК Пресс, 2022. 298 с.
9. Self-Matching CAM: A Novel Accurate Visual Explanation of CNNs for SAR Image Interpretation / Z. Feng, M. Zhu, L. Stankovic, H. Ji // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, iss. 9. Art. № 1772. doi: 10.3390/rs13091772
10. LIME-Based Data Selection Method for SAR Images Generation Using GAN / M. Zhu, B. Zang, L. Ding, T. Lei, Z. Feng, J. Fan // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 1. Art. № 204. doi: 10.3390/rs14010204
11. Fein-Ashley J., Kannan R., Prasanna V. Studying the Effects of Self-Attention on SAR Automatic Target Recognition. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.00473> (дата обращения 10.03.2025).
12. Taufique A. M. N., Nagananda N., Savakis A. Visualization of Deep Transfer Learning in SAR Imagery. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.11061> (дата обращения 10.03.2025).
13. SARDet-100K: Towards Open-Source Benchmark and ToolKit for Large-Scale SAR Object Detection / Y. Li, X. Li, W. Li, Q. Hou, L. Liu, M.-M. Cheng, J. Yang. URL: <https://arxiv.org/abs/2403.06534> (дата обращения 10.03.2025).
14. Kechagias-Stamatis O., Aouf N. Automatic Target Recognition on Synthetic Aperture Radar Imagery: A Survey. URL: <https://arxiv.org/abs/2007.02106> (дата обращения 10.03.2025).
15. NUDT4MSTAR: A New Dataset and Benchmark Towards SAR Target Recognition in the Wild / Y. Liu, W. Li, L. Liu, J. Zhou, X. Xiong, B. Peng, Y. Song, W. Yang, T. Liu, Z. Liu, X. Li. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.13354> (дата обращения 10.03.2025).
16. Купряшкин И. Ф., Мазин А. С. Визуализация шаблонов максимальной активации фильтров сверточной нейронной сети в задаче классификации зашумленных радиолокационных изображений объектов // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 4. С. 42–47.
17. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. СПб.: Питер, 2018. 400 с.
18. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization / R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, D. Batra. URL: <https://arxiv.org/abs/1610.02391> (дата обращения 10.03.2025).
19. Купряшкин И. Ф. Сравнительные результаты точности классификации радиолокационных изображений объектов набора MSTAR сверточными нейронными сетями с различными архитектурами // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 11. С. 1–27. doi: 10.30898/1684-1719.2021.11.14
20. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (дата обращения 10.03.2025).

Информация об авторе

Купряшкин Иван Федорович – доктор технических наук (2017), доцент (2011), начальник кафедры боевого применения средств РЭБ (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) Военного учебно-научного центра военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина". Автор более 100 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокационные системы; системы радиоэлектронного противодействия радиолокационным системам. Адрес: Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия E-mail: ifk78@mail.ru

References

1. Zhu X., Montazeri S., Ali M., Hua Yu., Wang Yu., Mou L., Shi Yi., Xu F., Bamler R. Deep Learning Meets SAR. Available at: <https://arxiv.org/abs/2006.10027> (accessed 10.03.2025).
2. Anas H., Majdoulayne H., Chaimae A., Nabil S. M. Deep Learning for SAR Image Classification. Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 1037. Cham, Springer, 2020, pp. 890–898. doi: 10.1007/978-3-030-29516-5_67
3. Li J., Xu C., Su H., Gao L., Wang T. Deep Learning for SAR Ship Detection: Past, Present and Future. Remote Sensing. 2022, vol. 14, iss. 11, art. no. 2712. doi: 10.3390/rs14112712
4. Wu T.-D., Wang H.-F., Hsu P.-H., Tiong K.-K., Chang L.-C., Chang C.-H. Target Detection and Recognition in Synthetic Aperture Radar Images Using YOLO Deep Learning Methods. Intern. Conf. on Consumer Electronics, PingTung, Taiwan, 17–19 July 2023. IEEE, 2023, pp. 593–594. doi: 10.1109/ICCE-Taiwan58799.2023.10226736
5. Yu C., Shin Y. SMEP-DETR: Transformer-Based Ship Detection for SAR Imagery with Multi-Edge Enhancement and Parallel Dilated Convolutions. Remote Sensing. 2025, vol. 17, iss. 6, art. no. 953. doi: 10.3390/rs17060953
6. Zhu M., Hu G., Zhou H., Wang S., Feng Z., Yue S. A Ship Detection Method via Redesigned FCOS in Large-Scale SAR Images. Remote Sensing. 2022, vol. 14, iss. 5, art. no. 1153. doi: 10.3390/rs14051153
7. Li W., Yang W., Hou Y., Liu L., Liu X., Li X. SARATR-X: A Foundation Model for Synthetic Aperture Radar Images Target Recognition. Available at: <https://arxiv.org/html/2405.09365v1> (accessed 10.03.2025).
8. Mishra P. *Ob'yasnimyye modeli iskusstvennogo intellekta na Python. Model' iskusstvennogo intellekta. Ob'yasneniya s ispol'zovaniyem bibliotek, rasshireniy i freymvorkov na osnove yazyka Python* [Practical Explainable AI Using Python: Artificial Intelligence Model Explanations Using Python-based Libraries, Extensions, and Frameworks]. Moscow, DMK Press, 2022, 298 p. (In Russ.)
9. Feng Z., Zhu M., Stankovic L., Ji H. Self-Matching CAM: A Novel Accurate Visual Explanation of CNNs for SAR Image Interpretation. Remote Sensing. 2021, vol. 13, iss. 9, art. no. 1772. doi: 10.3390/rs13091772
10. Zhu M., Zang B., Ding L., Lei T., Feng Z., Fan J. LIME-Based Data Selection Method for SAR Images Generation Using GAN. Remote Sensing. 2022, vol. 14, iss. 1, art. no. 204. doi: 10.3390/rs14010204
11. Fein-Ashley J., Kannan R., Prasanna V. Studying the Effects of Self-Attention on SAR Automatic Target Recognition. Available at: <https://arxiv.org/abs/2409.00473> (accessed 10.03.2025).
12. Taufique A. M. N., Nagananda N., Savakis A. Visualization of Deep Transfer Learning in SAR Imagery. Available at: <https://arxiv.org/abs/2103.11061> (accessed 10.03.2025).
13. Li Y., Li X., Li W., Hou Q., Liu L., Cheng M.-M., Yang J. SARDet-100K: Towards Open-Source Benchmark and ToolKit for Large-Scale SAR Object Detection. Available at: <https://arxiv.org/abs/2403.06534> (accessed 10.03.2025).
14. Kechagias-Stamatis O., Aouf N. Automatic Target Recognition on Synthetic Aperture Radar Imagery: A Survey. Available at: <https://arxiv.org/abs/2007.02106> (accessed 10.03.2025).
15. Liu Y., Li W., Liu L., Zhou J., Xiong X., Peng B., Song Y., Yang W., Liu T., Liu Z., Li X. NUDT4MSTAR: A New Dataset and Benchmark Towards SAR Target Recognition in the Wild. Available at: <https://arxiv.org/abs/2501.13354> (accessed 10.03.2025).
16. Kupryashkin I. F., Mazin A. S. Visualization of Convolutional Neural Network Patterns in the Noisy Radar Images Classification Problem. Digital Signal Processing. 2021, no. 4, pp. 42–47. (In Russ.)
17. Chollet F. Deep Learning with Python. Shelter Island, Manning Publications, 2017, 384 p.
18. Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra D. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization. Available at: <https://arxiv.org/abs/1610.02391> (accessed 24.10.2024).
19. Kupryashkin I. F. Comparative Results of the Classification Accuracy of MSTAR Dataset Radar Images by Convolutional Neural Networks with Different Architectures. J. of Radio Electronics. 2021, no. 11, pp. 1–27. (In Russ.) doi: 10.30898/1684-1719.2021.11.14
20. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. Available at: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (accessed 24.10.2024).

Information about the author

Ivan F. Kupryashkin, Dr Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor (2011), Head of the Department of Combat Use of Electronic Warfare Systems (with Aerospace Control Systems and Guided Weapons) of Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy". The author of more than 100 publications. Area of expertise: radar systems; systems of radio-electronic counteraction to radar. Address: Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", 54 A, Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia
E-mail: ifk78@mail.ru

Влияние размеров зерен на температурный гистерезис керамического титаната бария

И. Л. Мыльников^{1✉}, И. П. Сошников^{2,4,5}, А. И. Дедык¹, Ю. В. Павлова¹,
А. С. Анохин^{1,3}, А. В. Еськов¹, П. Ю. Белявский¹, А. С. Антонова¹, А. А. Семенов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Институт аналитического приборостроения
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

✉ mylnikov.il@gmail.com

Аннотация

Введение. Растущая мощность элементной базы современных электронных приборов задает новые стандарты охлаждения устройств. Перспективным методом охлаждения является использование электрокалорического эффекта как самого доступного и простого в реализации среди всех калорических эффектов. Однако тепловые гистерезисные эффекты вблизи точки фазового перехода отрицательно влияют на уровень электрокалорического отклика и, соответственно, на эффективность охлаждения. Также немаловажно требование к экологичности устройств, что не позволяет использовать в качестве материалов свинецсодержащие соединения, в которых электрокалорический эффект достигает больших значений. Альтернативным материалом могут выступать твердые растворы на основе титаната бария, однако изучению температурных гистерезисных явлений в них уделено очень мало внимания.

Цель работы. Исследование температурных гистерезисных явлений в сегнетоэлектрических керамиках.

Материалы и методы. Исследуемые образцы помещаются в жидкостный термостат и проходят цикл "нагрев-охлаждение" с заданной скоростью. По полученным температурным зависимостям диэлектрической проницаемости рассчитывается размер температурного гистерезиса. Оценка среднего размера зерен осуществляется по фотографиям поверхности образцов, полученным с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Результаты. Исследовано влияние процессов синтеза на структуру и размеры кристаллитов керамического титаната бария и их диэлектрические свойства. Экспериментально изучена зависимость размеров кристаллитов титаната бария и пористости образцов от температуры спекания. Определена область температур эффективного спекания выше 1320 °С. Исследованы диэлектрические характеристики синтезированных образцов при нагреве и охлаждении. Определены параметры температурного гистерезиса и диэлектрических свойств. Показано, что изменение температурного гистерезиса связано с изменением размеров кристаллитов титаната бария и площади контакта между ними.

Заключение. На основании полученных результатов выдвинуто предположение об оптимальной температуре спекания образцов, при которой материал обладает достаточно хорошими диэлектрическими свойствами, при этом уровень температурного гистерезиса мал.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, титанат бария, температурный гистерезис, размер зерна, электрокалорический эффект

Для цитирования: Влияние размеров зерен на температурный гистерезис керамического титаната бария / И. Л. Мыльников, И. П. Сошников, А. И. Дедык, Ю. В. Павлова, А. С. Анохин, А. В. Еськов, П. Ю. Белявский, А. С. Антонова, А. А. Семенов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 57–68.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-57-68

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № ФСЕЕ-2022-0017).

Статья поступила в редакцию 27.11.2024; принята к публикации после рецензирования 26.03.2025; опубликована онлайн 30.04.2025



Effect of Grain Sizes on Temperature Hysteresis of Ceramic Barium Titanate

Ivan L. Mylnikov¹✉, Ilya P. Soshnikov^{2,4,5}, Antonina I. Dedyk¹,
Yuliya V. Pavlova¹, Alexander S. Anokhin^{1,3}, Andrej V. Es'kov¹,
Pavel Yu. Belyavskiy¹, Anna S. Antonova¹, Alexander A. Semenov¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Alferov University, St Petersburg, Russia

³ ITMO University, St Petersburg, Russia

⁴ Ioffe Institute, St Petersburg, Russia

⁵ Institute for Analytical Instrumentation
of the Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

✉ mylnikov.il@gmail.com

Abstract

Introduction. The growing power of modern electronic devices imposes stricter requirements on their cooling systems. One promising cooling method employs the electrocaloric effect as the most accessible and simple phenomenon among all caloric effects to implement. However, thermal hysteresis near the phase transition point negatively affects the magnitude of the electrocaloric response and the cooling efficiency. Another important factor is the requirement for environmental friendliness of the devices, which makes the use of lead-containing compounds undesirable despite their pronounced electrocaloric effect. A possible alternative to such materials comprises solid solutions based on barium titanate; however, their temperature hysteresis phenomena are poorly studied.

Aim. Investigation of temperature hysteresis phenomena in ferroelectric ceramics.

Materials and methods. The samples under study were placed in a liquid thermostat to undergo a heating and cooling cycle at a given rate. The value of temperature hysteresis was calculated from the temperature dependencies of dielectric permittivity. The average grain size was estimated using SEM images of the sample surface.

Results. The influence of synthesis processes on the structure and grain size of ceramic barium titanate, as well as its dielectric properties, were studied. Temperature dependencies of the grain size of barium titanate and the porosity of sintered samples were studied experimentally. The temperature range of effective sintering above 1320 °C was determined. Dielectric characteristics of the samples at heating and cooling were studied. The parameters of temperature hysteresis and dielectric properties were determined. Changes in the value of temperature hysteresis were shown to be associated with changes in the grain size of barium titanate and the contact area between the grains.

Conclusion. An assumption about the optimal temperature of sample sintering was made. At this temperature, the material exhibits sufficiently good dielectric properties at a low temperature hysteresis.

Keywords: ferroelectric, barium titanate, temperature hysteresis, grain size, electrocaloric effect

For citation: Mylnikov I. L., Soshnikov I. P., Dedyk A. I., Pavlova Yu. V., Anokhin A. S., Es'kov A. V., Belyavskiy P. Yu., Antonova A. S., Semenov A. A. Effect of Grain Sizes on Temperature Hysteresis of Ceramic Barium Titanate. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 57–68.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-57-68

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The reported study was funded by Ministry of Education and Science of Russian Federation (grant No. FSEE-2022-0017)

Submitted 27.11.2024; accepted 26.03.2025; published online 30.04.2025

Введение. Проблемы развития техники и технологий современной микро-, нано- и оптоэлектроники во многом связаны с ограничени-

ем тепловых режимов работы приборов и структур [1]. Одним из перспективных направлений решения таких проблем являются систе-

мы охлаждения на структурах с фазовыми переходами второго рода, в частности, электрокалорическом эффекте (ЭКЭ) [2]. Подтверждением актуальности задачи разработки материалов и структур для ЭКЭ-систем охлаждения является рост интереса к ним в последнее время [2, 3].

В настоящее время наибольшая эффективность ЭКЭ показана в таких соединениях, как $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ [4] и $(\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-x}\text{PbTiO}_3)_{1-x}$ [5–7]. Однако свинецсодержащие соединения чрезвычайно опасны для человека и окружающей среды. Поэтому поиск альтернативных материалов является актуальной задачей, на которую, собственно, и направлено исследование, описываемое в данной статье. Хорошими кандидатами являются соединения со структурой перовскита, например титанат бария (BT) и титанат бария-стронция (BST) [8–10]. Особенность сегнетоэлектриков – различное положение точки Кюри при фазовом переходе (ФП) при нагреве и охлаждении. Это явление называется температурным гистерезисом $\Delta T_{\text{гист}}$ [11]. Размер температурного гистерезиса определяется материалом, его составом, структурой и морфологией [12–16]. Однако нельзя говорить только о размере зерен в образцах. Керамическая технология определяет совокупность таких микроструктурных свойств керамики, как плотность и пористость, а также форму зерен и их распределение по размерам [17–20].

Особо следует отметить проблему определения критической температуры синтеза ВТО: по различным данным эта температура варьируется от 1312 до 1337 °C [21]. Указанное различие явно превышает погрешность измерения температуры процесса и может быть связано с неконтролируемыми параметрами или особенностями технологического процесса подготовки материала.

Таким образом, цель научного исследования – изучить влияние режимов изготовления титаната бария на его структуру и температурный гистерезис диэлектрических свойств. В рамках данной работы решались следующие задачи: изготовление керамик BT при разных температурах спекания, исследование их структурных и диэлектрических свойств для определения размера температурного гистерезиса в данных образцах.

Методика эксперимента. Образцы керамического титаната бария изготавливались методом, который включает предварительную термообработку, мокрый помол, прессование и заключительную термообработку. Исходным материалом служил порошок титаната бария производства компании Toshima (Япония) с размером зерен 0.2...1 мкм. Предварительная термообработка порошка проводилась при температуре 1200 °C в течение 2 ч в муфельной печи ЭКПС-10 в условиях воздушной атмосферы. Далее следовал мокрый помол в изопропиловом спирте на планетарной мельнице Fritsch PULVERISETTE 7 при частоте вращения 800 мин⁻¹ в течение 20 мин. Затем порошок прессовался в диски диаметром 12 мм и толщиной 1.5 мм при давлении 6000 кг/см². Спекание полученных образцов осуществлялось в камерной электропечи ПБК-1.6-12 при температурах 1200...1450 °C (со скоростью нагрева 4 К/мин) в воздушной атмосфере в течение 1 ч. Осуществлялся тщательный контроль температуры: помимо стандартных замеров с помощью термопар (пирометров) рядом с образцами располагали контрольные кольца FERRO-STH с памятью формы. Измерение диаметра колец до и после отжига выполнялось с точностью до 0.01 мм, что позволяло оценивать максимальную температуру нагрева в пределах 1000...1500 °C с погрешностью не хуже 1 °C.

Исследования морфологии поверхности и поперечного сечения образцов проводились с помощью растрового электронного микроскопа Supra25 C. Zeiss, оборудованного детектором рентгеновского излучения Ultim Oxford Instruments Inc.

Пористость керамики определялась методом гидростатического взвешивания на лабораторных весах PX-224 OHAUS Pioneer. Полученные значения пористости составляли ~15 % для образцов с температурой обжига 1200...1325 °C и ~2...5 % для образцов с температурой спекания 1350...1450 °C.

Исследования диэлектрических характеристик при различных температурах проводились при помощи прецизионного измерителя LCR Keysight (Agilent) E4980A в термостате Julabo F32. Сначала образец нагревали до 150 °C, поддерживали эту температуру в течение 2 ч, а затем

охлаждали. Температуру изменяли равномерно со скоростью 0.02 °C/с.

Результаты и обсуждение. Синтезирована серия образцов при температурах обжига от 1200 до 1450 °C. Характерные микроскопические изображения морфологии образцов приведены на рис. 1.

На полученных электронно-микроскопических изображениях наблюдаются области с ярким и темным контрастом. Изображения образцов при больших увеличениях показывают, что области с ярким контрастом (рис. 2, а) содержат кристаллиты с размерами 0.5...2 мкм, близкими к размерам исходного порошка, и имеют высокую пористость (до 50 %). Отмечается наличие огранки зерен,

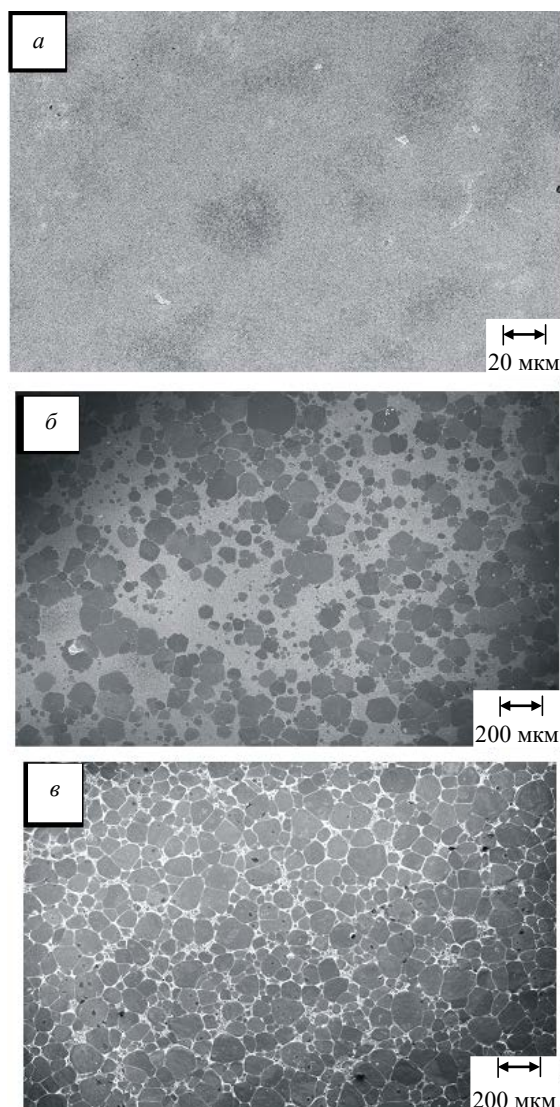


Рис. 1. Морфология поверхности керамик ВТО после обжига при температуре: а – 1250 °C; б – 1315 °C; в – 1350 °C

Fig. 1. Surfaces morphology of BTO ceramics sintered at a temperature of: а – 1250 °C; б – 1315 °C; в – 1350 °C

свидетельствующей об их кристаллической структуре. В то же время области с низким контрастом содержат блочную структуру с характерными размерами более 50 мкм (рис. 2, б). Наблюдаются поры с характерными размерами примерно 0.3...2 мкм и плотностью менее $10^9...10^{10}$ пор/см³, что соответствует менее чем 1 % объема образца. Отмечается наличие огранки в порах.

Образцы, синтезированные при температурах ниже 1300 °C, содержат практически только микрометровые кристаллиты (рис. 1, а). Образцы, синтезированные при температурах 1350 °C и выше, содержат крупные кристаллиты. Хорошо прослеживаются межзеренные границы, средний размер зерен возрастает до 100 мкм.

Результаты оценок размеров кристаллитов и плотности образцов представлены на рис. 3. Особо подчеркнем, что при температурах выше 1325 °C границы кристаллитов прилегают одна к другой, так что свободного пространства, определяющего пористость, практически не

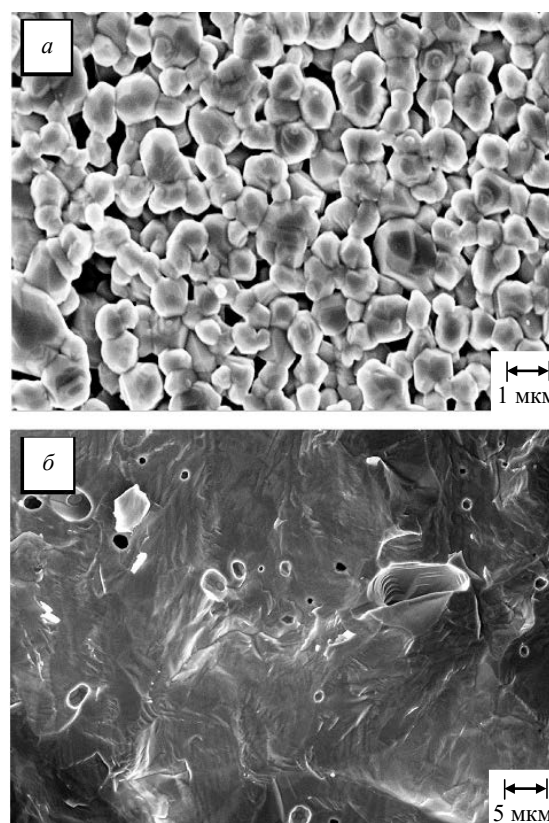


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения образцов керамики: а – при 1250 °C в яркой; б – при 1400 °C в темной областях

Fig. 2. Electron microscopic image of the cross-section of ceramic samples at a temperature of: а – 1250 °C in the light; б – dark regions at temperature of 1400 °C

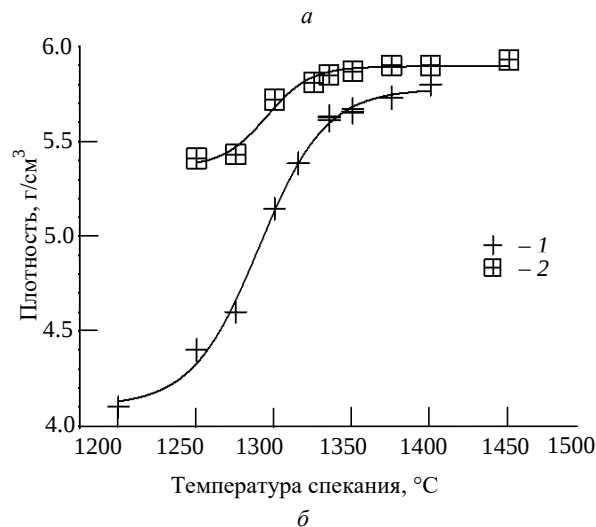
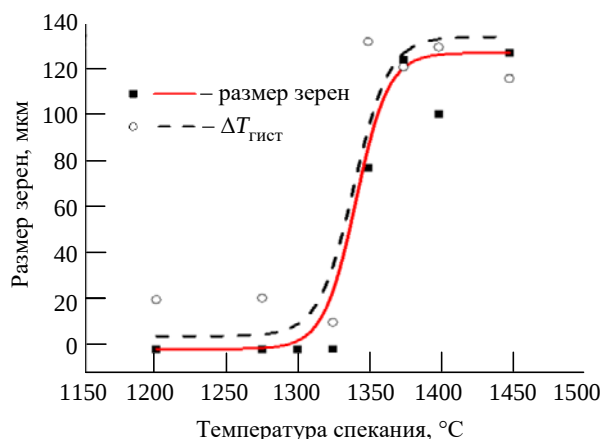


Рис. 3. Зависимость размера температурного гистерезиса, среднего размера зерен (а) и плотности образцов (б) от температуры спекания (1 и 2 – механические и гидростатические измерения плотности соответственно)

Fig. 3. Dependence of the temperature hysteresis, average grain size (a) and sample density (b) on the sintering temperature (1 and 2 – mechanical and hydrostatic density measurements)

остается. Состав образцов по результатам исследований энергодисперсионных спектров соответствует Ba:Ti 1:1.

Зависимость плотности образцов от температуры синтеза (рис. 3, б) носит ступенчатый характер, а ее значение изменяется от 5.4 г/см³ при $t < 1325$ °C до 5.9 г/см³ при $t > 1325$ °C.

Полученные значения плотности несколько ниже табличного значения 6.02 г/см³, что можно объяснить пористостью образцов. Результаты по плотности и морфологии образцов хорошо согласуются между собой и объясняются фазовым переходом Solid-Liquid для ВТО в области 1312...1337 °C [22].

Для всех описанных образцов были измерены температурные характеристики диэлектрической

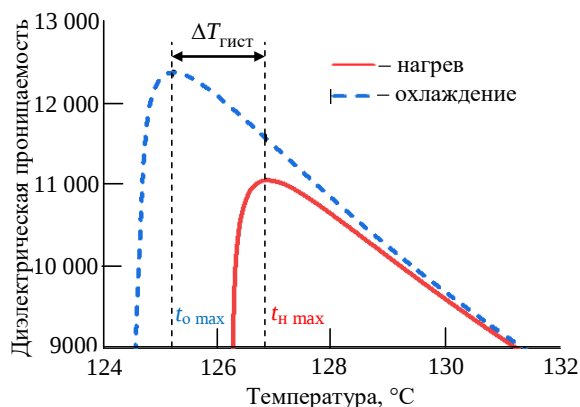


Рис. 4. Область фазового перехода для образца титаната бария, спеченного при температуре 1450 °C ($t_{o \max}$ – температура фазового перехода при охлаждении; $t_{n \max}$ – температура фазового перехода при нагреве)

Fig. 4. Phase transition region for a sample of barium titanate sintered at a temperature of 1450 °C

($t_{o \max}$ – temperature of the phase transition during cooling; $t_{n \max}$ – temperature of the phase transition during heating)

проницаемости в режимах нагрева и охлаждения. Пример такой зависимости для образца, синтезированного при температуре 1450 °C, приведен на рис. 4. Измеренные характеристики типичны для структур с фазовым переходом, близким к переходу первого рода [23, 24].

Образцы, синтезированные при температурах ниже 1325 °C, имеют пологую характеристику $\varepsilon(t)$ с максимумом диэлектрической проницаемости, который может достигать 6000 (кривые 1 и 2 на рис. 5). При температурах спекания выше 1325 °C значение диэлектрической проницаемости скачкообразно увеличивается (кривая 3 на рис. 5) в области температур, предшествующих

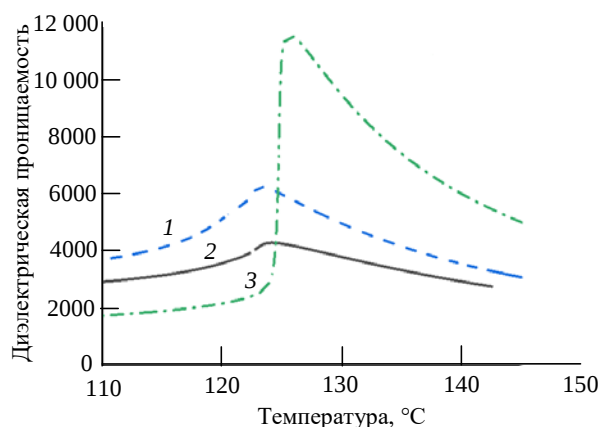


Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образцов после обжига при температуре: 1 – 1200 °C; 2 – 1325 °C; 3 – 1450 °C

Fig. 5. Temperature dependence on dielectric permittivity for barium titanate samples sintered at a temperature of: 1 – 1200 °C; 2 – 1325 °C; 3 – 1450 °C

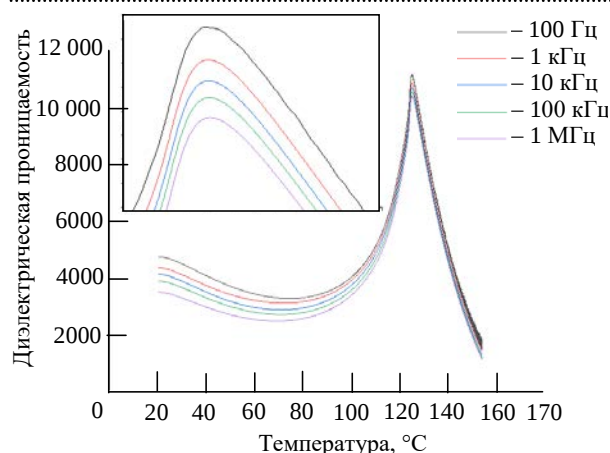


Рис. 6. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образца, спеченного при температуре 1275 °C

Fig. 6. Temperature dependence on dielectric permittivity for barium titanate sample sintered at a temperature of 1275 °C

фазовому переходу (в районе 125 °C), и максимальные значения ϵ достигают 12 000.

Весь цикл температурных измерений осуществлялся в диапазоне частот 100 Гц...1 МГц. На рис. 6 представлены температурные зависимости диэлектрической проницаемости при разных частотах для образца, спеченного при температуре 1275 °C. На врезке показана область фазового перехода.

Диэлектрическая проницаемость значительно изменяется в зависимости от частоты в интервале температур 20...90 °C. С приближением к точке фазового перехода дисперсия ϵ снижается, однако полностью не исчезает (как видно на врезке рис. 6). Последующее повышение температуры уже не вызывает значительного увеличения частотной зависимости диэлектрической проницаемости. Температурный порог фазового перехода остается стабильным и почти не подвержен влиянию изменений частоты.

Для образцов, спеченных при температурах выше 1325 °C, наблюдается слабая частотная зависимость диэлектрической проницаемости во всем диапазоне температур (рис. 7).

Однако вблизи фазового перехода наблюдается влияние частоты на температуру фазового перехода (врезка на рис. 7). При увеличении частоты фазовый переход смещается в область более высоких температур. Обнаруженная частотная зависимость диэлектрической проницаемости свидетельствует о наличии релаксационных свойств во всех исследованных керамиках титаната бария.

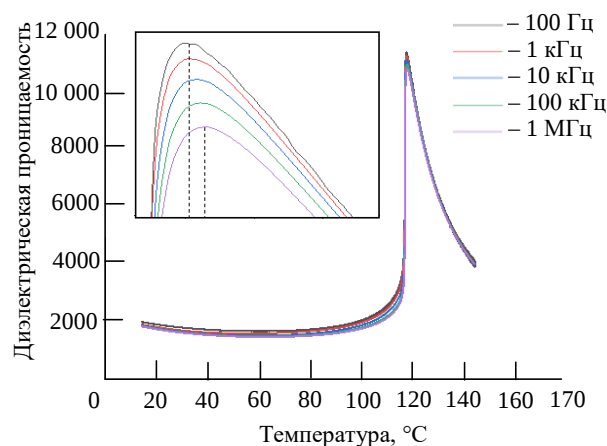


Рис. 7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образца, спеченного при температуре 1450 °C

Fig. 7. Temperature dependence on dielectric permittivity for barium titanate sample sintered at a temperature of 1450 °C

Экспериментально полученные зависимости $\epsilon(t)$ позволяют установить ключевые характеристики материала, включая температуры фазовых переходов $t_{\max}$ при нагревании ($t_{n\max}$) и охлаждении ($t_{o\max}$), пиковое значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{\max}$) и размер температурного гистерезиса ($\Delta T_{\text{гист}}$). Отличительная черта этих зависимостей – наличие различных температур максимума диэлектрической проницаемости при нагреве и охлаждении (так называемый температурный гистерезис). Этот эффект наблюдался во всех изученных образцах. Влияние температуры спекания на размер температурного гистерезиса $\Delta T_{\text{гист}}$ показано на рис. 3.

Температурный гистерезис $\Delta T_{\text{гист}}$ слабо зависит от частоты и сохраняет практически постоянное значение во всем диапазоне частот (рис. 8). Эта закономерность характерна для всех температур спекания.

Сопоставление графиков зависимостей плотности, температурного гистерезиса и среднего размера зерна от температуры обжига показывает, что все они имеют ступенчатый характер и области перехода на всех графиках хорошо согласуются, т. е. структура и диэлектрические свойства образцов определяются кинетикой спекания материала (ВТО).

При температурах обжига ниже 1325 °C (соответствует минимальной температуре плавления по фазовой диаграмме) частицы исходного порошка в образцах практически не взаимодействуют между собой и сами образцы

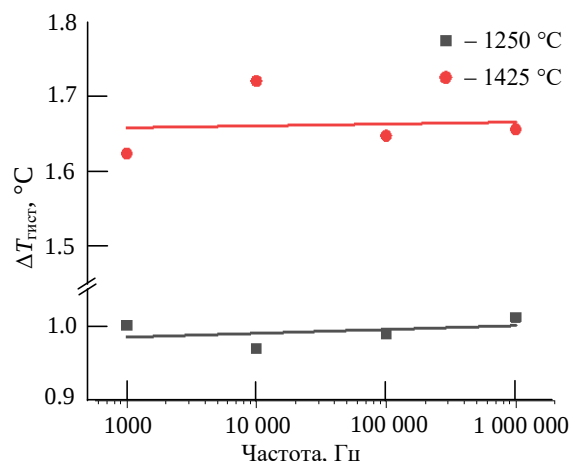


Рис. 8. Зависимость размера температурного гистерезиса от частоты

Fig. 8. Dependence of the temperature hysteresis on frequency

имеют высокую пористость, частицы контактируют между собой только в отдельных местах [25]. Указанное приводит к ухудшению диэлектрических свойств материала.

При температурах спекания 1325 °C и выше исходный порошок подвергается частичному расплавлению, в результате чего поры уходят и образуются плотно прилегающие кристаллиты титаната бария со структурой преимущественно перовскитного типа.

Оценка связи диэлектрической проницаемости и плотности дается формулой [26]:

$$\varepsilon^{1/2} = m\rho + 1, \quad (1)$$

где m – константа для данного материала; ρ – плотность. Сопоставление результатов плотности и диэлектрической проницаемости показывает хорошее согласие с формулой (рис. 9). Маркером обозначены экспериментальные данные, аппроксимирующая прямая соответствует уравнению (1).

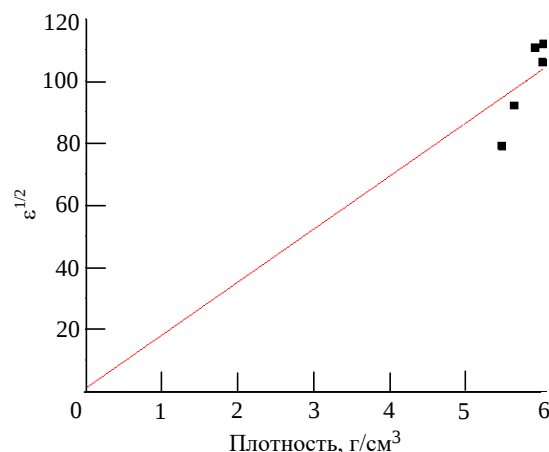


Рис. 9. Диаграмма "диэлектрическая проницаемость – плотность"

Fig. 9. Dielectric permittivity–density diagram

Выводы. Выявлено, что температура спекания 1325 °C играет ключевую роль в изменении структуры и морфологии образцов титаната бария.

Для образцов, спеченных при температурах ниже 1300 °C, характерны размеры зерен, сопоставимые с размерами зерен в исходном порошке (~1 мкм), а также низкие показатели диэлектрической проницаемости (~6000) и температурного гистерезиса (~1 °C).

При спекании в диапазоне температур 1325...1425 °C размер зерен увеличивается примерно до 100 мкм, одновременно достигаются значения диэлектрической проницаемости около 12 000 и температурного гистерезиса примерно 1.7 °C. Значение $\Delta T_{\text{гист}}$ в данном случае оказывается близким к показателям температурного гистерезиса для монокристаллического ВТО [12].

Различие диэлектрической проницаемости объясняется пористостью образцов. Изменение структуры и морфологии образцов связывается с фазовым переходом ВТО при температуре 1320...1325 °C.

Авторский вклад

Мыльников Иван Леонидович – подготовка текста статьи; измерение температурных зависимостей диэлектрической проницаемости керамических образцов титаната бария.

Сошников Илья Петрович – исследование морфологии керамических образцов титаната бария.

Дедык Антонина Ивановна – подготовка текста статьи; обсуждение результатов.

Павлова Юлия Валерьевна – обработка результатов измерений.

Анохин Александр Сергеевич – изготовление керамических образцов титаната бария; подготовка образцов к измерениям.

Еськов Андрей Владимирович – изготовление керамических образцов титаната бария; подготовка образцов к измерениям; обсуждение результатов.

Белявский Павел Юрьевич – обработка результатов измерений.

Антонова Анна Сергеевна – оценка среднего размера зерен в керамиках.

Семенов Александр Анатольевич – постановка задачи, обсуждение результатов.

Author's contribution

- Ivan L. Mylnikov**, preparation of the paper text; measurement of temperature dependences of prepared samples.
Ilya P. Soshnikov, investigation of the morphology of ceramic samples of barium titanate.
Antonina I. Dedyk, preparation of the paper text; discussion of the results.
Yuliya V. Pavlova, processing of measurement results.
Alexander S. Anokhin, production of ceramic samples of barium titanate; preparation of samples for measurements.
Andrej V. Es'kov, production of ceramic samples of barium titanate; preparation of samples for measurements, discussion of the results.
Pavel Yu. Belyavskiy, processing of measurement results.
Anna S. Antonova, estimation of the average grain size in ceramic.
Alexander A. Semenov, the problem definition; discussion of the results.

Список литературы

1. Thermal Conductivity Reduction and Thermoelectric Figure of Merit Increase by Embedding Nanoparticles in Crystalline Semiconductors / W. Kim, J. Zide, A. Gossard, D. Klenov, S. Stemmer, A. Shakouri, A. Majumdar // *Physical Rev. Lett.* 2006. Vol. 96, № 4. Art. № 045901.
doi: 10.1103/PhysRevLett.96.045901
2. Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies // *Progress in Materials Science.* 2012. Vol. 57, № 6. P. 980–1009.
doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.02.001
3. Electrocaloric refrigeration: thermodynamics, state of the art and future perspectives / M. Ožbolt, A. Kitanovski, J. Tušek, A. Poredoš // *Int. J. of refrigeration.* 2014. Vol. 40. P. 174–188.
doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.11.007
4. Giant Electrocaloric Effect in Thin-Film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ / A. S. Mischenko, Q. Zhang, J. F. Scott, R. W. Whatmore, N. D. Mathur // *Science.* 2006. Vol. 311, № 5765. P. 1270–1271.
doi: 10.1126/science.1123811
5. Shaobo L., Yanqiu L. Research on the electrocaloric effect of PMN/PT solid solution for ferroelectrics MEMS microcooler // *Materials Science and Engineering: B.* 2004. Vol. 113, № 1. P. 46–49.
doi: 10.1016/j.mseb.2004.06.010
6. Pyroelectric and electrocaloric effect of $\langle 111 \rangle$ -oriented 0.9 PMN–0.1 PT single crystal / L. Luo, H. Chen, Y. Zhu, W. Li, H. Luo, Y. Zhang // *J. of alloys and compounds.* 2011. Vol. 509, № 32. P. 8149–8152.
doi: 10.1016/j.jallcom.2011.05.111
7. Investigation of the electrocaloric effect in a $\text{PbMg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3}\text{O}_3$ – PbTiO_3 relaxor thin film / T. M. Correia, J. S. Young, R. W. Whatmore, J. F. Scott, N. D. Mathur, Q. Zhang // *Applied Physics Lett.* 2009. Vol. 95, № 18. Art. № 182904.
doi: 10.1063/1.3257695
8. Direct and indirect measurement of large electrocaloric effect in B_2O_3 – ZnO glass modified $\text{Ba}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{TiO}_3$ bulk ceramics / S. B. Wang, G. Z. Dai, Y. B. Yao, X. B. Zhao, T. Tao, B. Liang, S. G. Lu // *Scripta Materialia.* 2021. Vol. 193. P. 59–63.
doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.10.033
9. Xu Z., Qiang H. Enhanced electrocaloric effect in Mn+Y co-doped BST ceramics near room temperature // *Materials Lett.* 2017. Vol. 191. P. 57–60.
doi: 10.1016/j.matlet.2016.12.120
10. Electrocaloric effects in spark plasma sintered $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ -based ceramics: effects of domain sizes and phase constitution / X. Q. Liu, T. T. Chen, M. S. Fu, Y. J. Wu, X. M. Chen // *Ceramics Intern.* 2014. Vol. 40, № 7. P. 11269–11276.
doi: 10.1016/j.ceramint.2014.03.175
11. Исследование диэлектрических свойств керамик титаната бария, изготовленных при разных температурах спекания / И. Л. Мыльников, А. И. Дедык, Ю. В. Павлова, В. Ю. Нурмухаметов // *Материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. "Электроника и микроэлектроника СВЧ"*, Санкт-Петербург, 29 мая–03 июня 2023. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2023. С. 383–387.
12. Физика сегнетоэлектрических явлений / Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов, Н. Н. Крайник, Р. Е. Пасынков, А. И. Соколов, Н. К. Юшин. Л.: Наука, 1985. 396 с.
13. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы / пер. с англ. Л. А. Фейгина и Б. К. Севастьянова; под ред. Л. А. Шувалова. М.: Мир, 1965. 555 с.
14. $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$ solid solutions sintered from sol gel derived powders: An insight into the composition and temperature dependent dielectric behavior / R. E. Patru, C. P. Ganea, C. A. Stanciu, V. A. Surdu, R. Trusca, A. C. Ianculescu, I. Pintilie, L. Pintilie // *Ceramics Intern.* 2020. Vol. 46, № 4. P. 4180–4190.
doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.136
15. Observation of a negative thermal hysteresis in relaxor ferroelectric polymers / Y. Liu, A. Haibibu, W. Xu, Z. Han, Q. Wang // *Advanced Functional Materials.* 2020. Vol. 30, № 25. Art. № 2000648.
doi: 10.1002/adfm.202000648
16. Martirena H. T., Burfoot J. C. Grain-size effects on properties of some ferroelectric ceramics // *J. of Physics C: Solid State Physics.* 1974. Vol. 7, № 17. P. 3182–3192.
doi: 10.1088/0022-3719/7/17/024
17. Kim B. C., Chae K. W., Cheon C. I. Effect of sintering temperature on the ferroelectric properties and the electro-caloric effect in barium-titanate ceramics // *J. of the Korean Physical Society.* 2020. Vol. 76, № 3. P. 226–230.

doi: 10.3938/jkps.76.226

18. Исследования физических свойств и электрокалорического эффекта в нано- и микрокерамике BaTiO₃ / А. В. Карташев, В. С. Бондарев, И. Н. Флёров, М. В. Горев, Е. И. Погорельцев, А. В. Шабанов, М. С. Молокеев, S. Guillemet-Fritsch, И. П. Раевский // ФТТ. 2019. Т. 61, № 6. С. 1128–1137.

doi: 10.21883/FTT.2019.06.47689.309

19. Grain-size effects on dielectric and piezoelectric properties of poled BaTiO₃ ceramics / P. Zheng, J. L. Zhang, Y. Q. Tan, C. L. Wang // Acta Materialia. 2012. Vol. 60, № 13–14. P. 5022–5030.

doi: 10.1016/j.actamat.2012.06.015

20. Зависимость диэлектрических свойств керамики титаната бария и композита на его основе от температуры спекания / О. В. Мальштина, А. И. Иванова, Г. С. Шишков, А. А. Мартыанов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24, № 1. С. 40–47.

doi: 10.17073/1609 3577 2021-1-40-47

21. Ritter J. J., Roth R. S., Blendell J. E. Alkoxide precursor synthesis and characterization of phases in the barium-titanium oxide system // J. of the American Ceramic Society. 1986. Vol. 69, № 2. P. 155–162.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1986.tb04721.x

22. Kirby K. W., Wechsler B. A. Phase relations in the barium titanate-titanium oxide system // J. of the American Ceramic Society. 1991. Vol. 74, № 8. P. 1841–1847.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb07797.x

23. Lu X., Jin Z. Thermodynamic assessment of the BaO–TiO₂ quasibinary system // Calphad. 2000. Vol. 24, № 3. P. 319–338.

doi: 10.1016/S0364-5916(01)00008-6

24. Gong W., Jin Z. Thermodynamic description of BaO–SrO–TiO₂ system // Calphad. 2002. Vol. 26, № 3. P. 403–418.

doi: 10.1016/S0364-5916(02)00053-6

25. Джонс В. Д. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание / пер. М. А. Маураха, Б. С. Лысова; под ред. М. Ю. Бальшина, А. К. Натансона. М.: Мир, 1965. 404 с.

26. Nelson S. O. Density-permittivity relationships for powdered and granular materials // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2005. Vol. 54, № 5. P. 2033–2040.

doi: 10.1109/TIM.2005.853346

Информация об авторе

Мыльников Иван Леонидович – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2013, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), ассистент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; мультиферроики.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: mylnikov.il@gmail.com

https://orcid.org/0000-0003-3084-3394

Сошников Илья Петрович – кандидат физико-математических наук (1997), ведущий научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН/Алферовский университет/ Институт аналитического приборостроения РАН. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – характеристика структуры наноматериалов (электронная микроскопия, микроанализ); постростовые технологии; пьезоматериалы.

Адрес: Алферовский университет, ул. Хлопина, д. 8, к. 3, Санкт-Петербург, 194021, Россия

E-mail: ipsosh@beam.ioffe.ru

https://orcid.org/0000-0002-9001-7599

Дедык Антонина Ивановна – кандидат физико-математических наук (1986), доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; мультиферроики; тонкие пленки; керамика; монокристаллы; электрофизические свойства сегнетоэлектриков.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: dedyk_ai@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-7360-1267

Павлова Юлия Валерьевна – кандидат технических наук (2008), доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; титанат бария; гистерезис; сегнетокерамика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: yulia.pavlova@gmail.com

https://orcid.org/0009-0001-7261-1551

Влияние размеров зерен на температурный гистерезис керамического титаната бария

Effect of Grain Sizes on Temperature Hysteresis of Ceramic Barium Titanate

Анохин Александр Сергеевич – кандидат технических наук (2022), инженер образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы" Университета ИТМО. Автор 25 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пирозлектрический эффект; мультиферроики. Адрес: Университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49 А, Санкт-Петербург, 197101, Россия
E-mail: asanokhin@itmo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0499-4159>

Еськов Андрей Владимирович – кандидат технических наук (2014), руководитель лаборатории технологии материалов и элементов интегральной радиофотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пирозлектрический эффект; мультиферроики; интегральная радиофотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aeskow@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Белявский Павел Юрьевич – кандидат физико-математических наук (2008), инженер кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 75 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорика; сегнетоэлектрические пленки. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: pybelyavskiy@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9136-0831>

Антонова Анна Сергеевна – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирантка кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; керамика; титанат бария. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: as.antonova17@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-6098-9677>

Семенов Александр Анатольевич – доктор технических наук (2017), заведующий кафедрой физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – электроника СВЧ; сегнетоэлектрики; технология тонких пленок; мультиферроики; интегральная радиофотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aasemenov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>

References

1. Kim W., Zide J., Gossard A., Klenov D., Stemmer S., Shakouri A., Majumdar A. Thermal Conductivity Reduction and Thermoelectric Figure of Merit Increase by Embedding Nanoparticles in Crystalline Semiconductors. *Physical Rev. Lett.* 2006, vol. 96, no. 4, art. no. 045901. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.045901
2. Valant M. Electrocaloric Materials for Future Solid-State Refrigeration Technologies. *Progress in Materials Science.* 2012, vol. 57, no. 6, pp. 980–1009. doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.02.001
3. Ožbolt M., Kitanovski A., Tušek J., Poredoš A. Electrocaloric Refrigeration: Thermodynamics, State of the Art and Future Perspectives. *Int. J. of Refrigeration.* 2014, vol. 40, pp. 174–188. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.11.007
4. Mischenko A. S., Zhang Q., Scott J. F., Whatmore R. W., Mathur N. D. Giant Electrocaloric Effect in Thin-Film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$. *Science.* 2006, vol. 311, no. 5765, pp. 1270–1271. doi: 10.1126/science.1123811
5. Shaobo L., Yanqiu L. Research on the Electrocaloric Effect of PMN/PT Solid Solution for Ferroelectrics MEMS Microcooler. *Materials Science and Engineering: B.* 2004, vol. 113, no. 1, pp. 46–49. doi: 10.1016/j.mseb.2004.06.010
6. Luo L., Chen H., Zhu Y., Li W., Luo H., Zhang Y. Pyroelectric and Electrocaloric Effect of $\langle 111 \rangle$ -Oriented 0.9 PMN–0.1 PT Single Crystal. *J. of Alloys and Compounds.* 2011, vol. 509, no. 32, pp. 8149–8152. doi: 10.1016/j.jallcom.2011.05.111
7. Correia T. M., Young J. S., Whatmore R. W., Scott J. F., Mathur N. D., Zhang Q. Investigation of the Electrocaloric Effect in a $\text{PbMg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3}\text{O}_3$ – PbTiO_3 Relaxor Thin Film. *Applied Physics Lett.* 2009, vol. 95, no. 18,

art. no. 182904.

doi: 10.1063/1.3257695

8. Wang S. B., Dai G. Z., Yao Y. B., Zhao X. B., Tao T., Liang B., Lu S. G. Direct and Indirect Measurement of Large Electrocaloric Effect in B_2O_3 -ZnO Glass Modified $Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO_3$ Bulk Ceramics. Scripta Materialia. 2021, vol. 193, pp. 59–63.

doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.10.033

9. Xu Z., Qiang H. Enhanced Electrocaloric Effect in Mn+Y Co-doped BST Ceramics Near Room Temperature. Materials Let. 2017, vol. 191, pp. 57–60.

doi: 10.1016/j.matlet.2016.12.120

10. Liu X. Q., Chen T. T., Fu M. S., Wu Y. J., Chen X. M. Electrocaloric Effects in Spark Plasma Sintered $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ -Based Ceramics: Effects of Domain Sizes and Phase Constitution. Ceramics Intern. 2014, vol. 40, no. 7, pp. 11269–11276.

doi: 10.1016/j.ceramint.2014.03.175

11. Mylnikov I. L., Dedyk A. I., Pavlova Yu. V., Nurmuhametov V. Yu. *Issledovanie dielektricheskikh svoystv keramik titanata bariya, izgotovlennykh pri raznykh temperaturakh spekaniya* [Study of Dielectric Properties of Barium Titanate Ceramics Produced at Different Sintering Temperatures]. Proc. of the XII All-Russ. Scientific and Technical Conf. "Microwave Electronics and Microelectronics", St Petersburg, 29 May–03 June 2023. St Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University, 2023, pp. 383–387. (In Russ.)

12. Smolenskiy G. A. *Fizika segnetoelektricheskikh yavlenij* [Physics of Ferroelectric Phenomena]. L.: Nauka, 1985, 396 p. (In Russ.)

13. Jona F., Shirane G. Ferroelectric Crystals. New York, Pergamon Press, 1962, 402 p.

14. Patru R. E., Ganea C. P., Stanciu C. A., Surdu V. A., Trusca R., Ianculescu A. C., Pintilie I., Pintilie L. (Ba,Sr)TiO₃ Solid Solutions Sintered from Sol Gel Derived Powders: An Insight into the Composition and Temperature Dependent Dielectric Behavior. Ceramics Intern. 2020, vol. 46, no. 4, pp. 4180–4190.

doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.136

15. Liu Y., Haibibu A., Xu W., Han Z., Wang Q. Observation of a Negative Thermal Hysteresis in Relaxor Ferroelectric Polymers. Advanced Functional Materials. 2020, vol. 30, no. 25, art. no. 2000648.

doi: 10.1002/adfm.202000648

16. Martirena H. T., Burfoot J. C. Grain-Size Effects on Properties of Some Ferroelectric Ceramics. J. of Physics C: Solid State Physics. 1974, vol. 7, no. 17, pp. 3182–3192.

doi: 10.1088/0022 3719/7/17/024

17. Kim B. C., Chae K. W., Cheon C. I. Effect of Sintering Temperature on the Ferroelectric Properties and the Electro-Caloric Effect in Barium-Titanate Ceramics. J. of the Korean Physical Society. 2020, vol. 76, no. 3, pp. 226–230.

doi: 10.3938/jkps.76.226

18. Kartashev A. V., Bondarev V. S., Flyorov I. N., Gorev M. V., Pogorel'cev E. I., SHabanov A. V., Molo-keev M. S., Guillemet-Fritsch S., Raevskij I. P. Study of the Physical Properties and Electrocaloric Effect in the BaTiO₃ Nano- and Microceramics. Physics of the Solid State. 2019, vol. 61, pp. 1052–1061.

doi: 10.1134/S1063783419060088

19. Zheng P., Zhang J. L., Tan Y. Q., Wang C. L. Grain-Size Effects on Dielectric and Piezoelectric Properties of Poled BaTiO₃ Ceramics. Acta Materialia. 2012, vol. 60, no. 13–14, pp. 5022–5030.

doi: 10.1016/j.actamat.2012.06.015

20. Malyshkina O. V., Ivanova A. I., Shishkov G. S., Mart'yanov A. A. Dependence of the Dielectric Properties of Barium Titanate Ceramics and a Composite Based on It on the Sintering Temperature. Materials of Electronics Engineering. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 40–47. (In Russ.)

doi: 10.17073/1609 3577 2021-1-40-47

21. Ritter J. J., Roth R. S., Blendell J. E. Alkoxide Precursor Synthesis and Characterization of Phases in the Barium-Titanium Oxide System. J. of the American Ceramic Society. 1986, vol. 69, no. 2, pp. 155–162.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1986.tb04721.x

22. Kirby K. W., Wechsler B. A. Phase Relations in the Barium Titanate-Titanium Oxide System. J. of the American Ceramic Society. 1991, vol. 74, no. 8, pp. 1841–1847.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb07797.x

23. Lu X., Jin Z. Thermodynamic Assessment of the BaO–TiO₂ Quasibinary System. Calphad. 2000, vol. 24, no. 3, pp. 319–338.

doi: 10.1016/S0364-5916(01)00008-6

24. Gong W., Jin Z. Thermodynamic Description of BaO–SrO–TiO₂ System. Calphad. 2002, vol. 26, no. 3, pp. 403–418.

doi: 10.1016/S0364-5916(02)00053-6

25. Jones W. D. Fundamental Principles of Powder Metallurgy. London, E. Arnold, 1960, 1032 p.

26. Nelson S. O. Density-Permittivity Relationships for Powdered and Granular Materials. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2005, vol. 54, no. 5, pp. 2033–2040.

doi: 10.1109/TIM.2005.853346

Information about the authors

Ivan L. Mylnikov, Master in Electronics and Nanoelectronics (2013, Saint Petersburg Electrotechnical University), Assistant of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; multiferroics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: mylnikov.il@gmail.com

https://orcid.org/0000-0003-3084-3394

Ilya P. Soshnikov, Cand. Sci. (Eng.) (1997), Leading Researcher of Ioffe Institute /Alferov University/ Institute of Analytical Instrumentation. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: characterization of the structure of nanomaterials (electron microscopy, microanalysis); post-construction technologies; piezo materials. Address: Alferov University, 8, Khlopina St., St Petersburg 194021, Russia
E-mail: ipsosh@beam.ioffe.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9001-7599>

Antonina I. Dedyk, Cand. Sci. (Eng.) (1986), Associate Professor of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; multiferroics; thin films; ceramics; single crystals; electrophysical properties of ferroelectrics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: dedyk_ai@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7360-1267>

Yuliya V. Pavlova, Cand. Sci. (Eng.) (2008), Associate Professor of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 35 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; barium titanate; hysteresis; ferroceramics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: yulia.pavlova@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-7261-1551>

Alexander S. Anokhin, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Engineer of educational center "Energy Effective engineering systems" of ITMO University. The author of 25 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; pyroelectric effect; multiferroics. Address: ITMO University, 49 A, Kronverkskii Ave., St Petersburg 197101, Russia
E-mail: asanokhin@itmo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0499-4159>

Andrej V. Es'kov, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Head of the Laboratory of Technology of Materials and Elements of Integrated Microwave Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; pyroelectric effect; multiferroics; integrated microwave photonics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aeskow@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Pavel Yu. Belyavskiy, Cand. Sci. (Eng.) (2008), Engineer of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 75 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocalorics; ferroelectric films. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: pybelyavskiy@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9136-0831>

Anna S. Antonova, Master in Electronics and Nanoelectronics (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; ceramics; barium titanate. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: as.antonova17@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-6098-9677>

Alexander A. Semenov, Dr Sci. (Eng.) (2017), Head of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics; thin films technology; ferroelectrics; multiferroics; integrated microwave photonics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aasemenov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>

Модель асимметричного сдвига порогового напряжения МОП-структур при термополевых обработках

О. В. Александров, Н. Н. Морозов 

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

 laughter-maiden@mail.ru

Аннотация

Введение. При термополевых обработках (ТПО) МОП-структур наблюдается нестабильность порогового напряжения, связанная с транспортом подвижных ионов примесей щелочноземельных металлов (в основном Na^+) в электрическом поле подзатворного диэлектрика. Экспериментальные кинетики накопления и восстановления подвижного заряда при ТПО отклоняются от известных моделей: диффузионной модели Сноу и модели пограничного захвата Хофстейна.

Цель работы. Разработка количественной модели поведения МОП-структур при термополевых обработках в режимах накопления и восстановления подвижного заряда ионной примеси.

Материалы и методы. Модель базируется на анализе кинетики захвата подвижных ионов примеси на полиэнергетические ловушки в объеме аморфного подзатворного диэлектрика. На основе анализа физических процессов составлена система дифференциальных уравнений, которая решается методом конечных разностей по явной и неявной разностным схемам.

Результаты. Из сопоставления расчетов по модели с литературными экспериментальными данными для временных зависимостей смещения порогового напряжения МОП-структур при положительном и последующем отрицательном смещении затвора определены: диапазон энергий связи, характеристическая энергия дисперсии, концентрации ионов примеси и ловушек вблизи затвора и кремниевой подложки, а также ширина области их локализации. Обнаружено уменьшение диапазона энергий связи вблизи межфазной границы $\text{SiO}_2\text{--Si}$ по сравнению с межфазной границей $\text{SiO}_2\text{--металлический затвор}$, что может свидетельствовать о наличии упорядоченного тонкого слоя SiO_2 вблизи кремния.

Заключение. Показано, что процесс восстановления заряда происходит с большей скоростью, чем процесс накопления, вследствие различия в распределениях ловушек вблизи межфазных границ SiO_2 с кремниевой подложкой и с затвором. Предложенная модель позволяет описать экспериментальное асимметричное поведение МОП-структур, загрязненных ионами щелочноземельных металлов при ТПО.

Ключевые слова: МОП-структура, подзатворный диэлектрик, подвижный заряд, термополевая обработка, дисперсионный транспорт

Для цитирования: Александров О. В., Морозов Н. Н. Модель асимметричного сдвига порогового напряжения МОП-структур при термополевых обработках // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 69–79.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-69-79

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; принята к публикации после рецензирования 25.12.2024; опубликована онлайн 30.04.2025



Modeling Asymmetric Shift in the Threshold Voltage of MOS Structures under Thermal Field Treatment

Oleg V. Aleksandrov, Nikita N. Morozov ✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ laughter-maiden@mail.ru

Abstract

Introduction. Thermal field treatment (TFT) of MOS structures causes instability of the threshold voltage associated with the transport of mobile ions of alkaline earth metal impurities (mainly Na^+) in the electric field of the gate dielectric. Experimental kinetics of accumulation and restoration of the mobile charge during TFT deviate from the known descriptions by Snow's diffusion and Hofstein's boundary capture models.

Aim. Development of a quantitative model for the behavior of MOS structures during thermal field treatment in the modes of accumulation and restoration of the mobile charge of an ionic impurity.

Materials and methods. The model is based on the analysis of the capture kinetics of mobile impurity ions on polyenergetic traps in the volume of an amorphous gate dielectric. Following the analysis of physical processes, a system of differential equations is compiled and solved by the finite difference method using explicit and implicit difference schemes.

Results. The conducted comparison of the data calculated by the developed model and the experimental data reported in literature for the time dependencies of the threshold voltage shift of MOS structures with positive and subsequent negative gate bias determined the range of binding energies, the characteristic dispersion energy, the concentrations of impurity ions and traps near the gate and the silicon substrate, and the width of the region of their localization. A decrease in the range of binding energies in the vicinity of the SiO_2 –Si interface compared to the SiO_2 –metal gate interface was found, which may indicate the presence of an ordered thin SiO_2 layer in the vicinity of silicon.

Conclusion. It was shown that the charge recovery process occurs at a higher rate than the accumulation process due to the difference in the distribution of traps in the vicinity of the interphase boundaries of SiO_2 with the silicon substrate and with the gate. The proposed model can be used to describe the experimental asymmetric behavior of MOS structures contaminated with alkaline earth metal ions during TFT.

Keywords: MOS structure, gate dielectric, mobile charge, thermal field treatment, dispersion transport

For citation: Aleksandrov O. V., Morozov N. N. Modeling Asymmetric Shift in the Threshold Voltage of MOS Structures under Thermal Field Treatment. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 69–79.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-69-79

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 02.09.2024; accepted 25.12.2024; published online 30.04.2025

Введение. Материал данной статьи был представлен на XIII Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и микроэлектроника СВЧ" в виде тезисов.

При термополевых обработках (ТПО) МОП-структур с положительным напряжением на затворе может наблюдаться нестабильность порогового напряжения (Positive Bias Temperature Instability – PBTI) [1, 2]. Явление связывается с транспортом подвижных ионов примесей щелочноземельных металлов (в основном Na^+) от затвора к кремниевой подложке в электрическом поле подзатворного диэлектрика. Для описания

кинетики накопления подвижного заряда при ТПО были предложены две основные модели: диффузионная модель Сноу [3] и модель пограничного захвата (Interface Trapping Model) Хофстейна [4]. В первой модели перенос подвижного заряда от затвора к Si-подложке определяется скоростью диффузии и дрейфа свободных ионов примеси в диэлектрике. Величина накопленного подвижного заряда пропорциональна корню квадратному из времени ТПО:

$$Q \sim \sqrt{t}. \quad (1)$$

Во второй модели скорость накопления за-

ряда определяется скоростью освобождения примеси с межфазной границы (МФГ) диэлектрика с затвором. В этом случае

$$Q = Q_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (2)$$

где Q_0 – начальный заряд; τ – постоянная времени ($\tau^{-1} = \nu \exp(-E/(kT))$, где ν – частотный фактор; E – энергия связи; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура).

При смене полярности происходит уменьшение (восстановление) заряда у Si-подложки вследствие его обратного перемещения к затвору. По диффузионной модели оно должно происходить с той же скоростью, что и накопление (симметричное поведение), а по модели пограничного захвата восстановление должно происходить значительно быстрее, чем накопление (асимметричное поведение), вследствие высокой скорости транспорта свободной примеси. На практике наблюдается как асимметричное (в обычных оксидах), так и симметричное (в хлорированных оксидах) поведение, причем кинетики накопления и восстановления отклоняются от простых зависимостей (1) и (2) [3, 4].

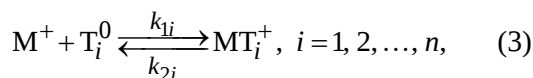
Отклонение может быть связано с захватом примеси на ловушки, находящиеся в объеме диэлектрика и приводящие к замедлению скорости переноса ионов примеси [5]. Причем в структуре аморфного диоксида кремния ловушки могут быть полиэнергетическими, т. е. иметь разброс (дисперсию) по энергиям связи.

Полиэнергетичность ловушек связана с нарушением дальнего порядка в структуре аморфного SiO_2 вследствие разброса диэлектрических углов между тетраэдрами SiO_4 в диапазоне $120...180^\circ$ [6]. Это приводит к дисперсии энергий связи ионов примеси с дефектами и к дисперсионному характеру транспорта примеси. Дисперсионный транспорт в неупорядоченных материалах описывается моделью случайных блужданий с непрерывным временем [7], а также эквивалентной ей моделью многократного захвата [8–10].

Цель статьи – разработка модели поведения МОП-структур при ТПО, учитывающей многократный захват примеси на полиэнергетические ловушки в объеме аморфного подзатворного диэлектрика, и описание поведения МОП-

структур при ТПО в режимах накопления и восстановления подвижного заряда.

Модель. В подзатворном диэлектрике МОП-структуры – аморфном диоксиде кремния SiO_2 имеются нарушения структуры, которые служат полиэнергетическими ловушками для подвижных ионов примеси. Полагаем, что транспорт подвижных (mobile) ионов примеси M^+ в объеме диоксида кремния сопряжен с многократным захватом на нейтральные полиэнергетические ловушки (traps) T_i^0 с образованием положительно заряженных комплексов MT_i^+ :



где k_{1i} и k_{2i} – константы скоростей прямой и обратной реакций примеси с i -й ловушкой. Система диффузионно-дрейфовых уравнений непрерывности с учетом реакции (3) и уравнения Пуассона, описывающая транспорт ионов примеси, принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{M^+}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{M^+}}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial}{\partial x} (C_{M^+} E) - \\ - C_{M^+} \sum_{i=0}^n k_{1i} C_{T_i^0} + \sum_{i=0}^n k_{2i} C_{MT_i^+}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{MT_i^+}}{\partial t} = - \frac{\partial C_{T_i^0}}{\partial t} = \\ = k_{1i} C_{M^+} C_{T_i^0} - k_{2i} C_{MT_i^+}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} = - \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \left(C_{M^+} + \sum_{i=1}^n C_{MT_i^+} \right), \quad (6)$$

где C_{M^+} – концентрация свободных (не захваченных на ловушки) ионов примеси M^+ ; t – время ТПО; $D = \mu \frac{kT}{q}$ – коэффициент диффузии свободных ионов (q – элементарный заряд); x – координата по толщине оксида d от $x = 0$ на МФГ Si– SiO_2 и $x = d$ на МФГ SiO_2 –затвор;

$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$ – подвижность свободных ионов (μ_0 – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации); $E = -\frac{dV}{dx}$ –

напряженность; C_{Ti}^0 – концентрация i -х нейтральных ловушек Ti^0 ; $C_{MT_i^+}$ – концентрация i -х положительно заряженных комплексов MT_i^+ ; V – потенциал; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость ($\epsilon(\text{SiO}_2) = 3.9$); ϵ_0 – электрическая постоянная.

Полагаем, что скорость захвата ионов примеси одинакова для различных ловушек и при диффузионном приближении константа скорости прямой реакции (3) определяется коэффициентом диффузии свободных ионов

$$k_{1i} = k_1 = 4\pi RD,$$

где $R \approx 1 \text{ \AA}$ – эффективный радиус захвата иона на ловушку. Константа скорости обратной реакции определяется энергией связи иона с i -й ловушкой E_{bi} :

$$k_{2i} = \nu \exp\left(-\frac{E_{bi}}{kT}\right),$$

где $\nu = 10^{12} \text{ с}^{-1}$ – частота колебаний атомов. Энергия связи равномерно распределена внутри диапазона от E_{b1} до E_{bn} :

$$E_{bi} = E_{b1} + \Delta E_{bi}(i-1), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\Delta E_{bi} = \frac{E_{bn} - E_{b1}}{n}$ – приращение по энергии.

Полагаем, что распределение ловушек по энергиям имеет экспоненциальный вид, характерный для неупорядоченных материалов [11]:

$$\frac{\partial C_{Ti}(x, E_{bi})}{\partial E_{bi}} = C_{Ti}(x) \frac{1}{E_0} \exp\left(-\frac{E_{bi}}{E_0}\right), \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где $C_{Ti}(x, E_{bi})\Delta E_{bi}$ – концентрация ловушек с энергиями в диапазоне от E_{bi} до $E_{bi} + \Delta E_{bi}$; E_0 – характеристическая энергия;

$$C_T(x) = \frac{Q'_{Ti}}{L_{Si}} \exp\left(-\frac{x}{L_{Si}}\right) + \frac{Q'_{TMe}}{L_{Me}} \exp\left(-\frac{d-x}{L_{Me}}\right) \quad (8)$$

– распределение ловушек по координате, которое

полагаем экспоненциальным вблизи обеих МФГ, где Q'_{Ti} , Q'_{TMe} – соответственно, интегральные концентрации ловушек вблизи МФГ Si-SiO₂ и МФГ SiO₂-затвор без учета дисперсии по энергиям; L_{Si} , L_{Me} – ширины соответствующих экспоненциальных распределений.

Просуммировав уравнения (8) по энергиям, заменив сумму на интеграл, найдем выражение для суммарной концентрации ловушек в выбранном диапазоне $E_{b1} \dots E_{bn}$:

$$C_{T \text{ sum}}(x) = \sum_{i=1}^n C_{Ti}(x, E_{bi})\Delta E_{bi} =$$

$$= \int_{E_{b1}}^{E_{bn}} C_{Ti}(x, E_{bi})dE_{bi} =$$

$$= C_T(x) \left[\exp\left(-\frac{E_{b1}}{E_0}\right) - \exp\left(-\frac{E_{bn}}{E_0}\right) \right]. \quad (9)$$

Интегральные концентрации ловушек в этом диапазоне из (9):

$$Q_{Ti} = Q'_{Ti} \left[\exp\left(-\frac{E_{b1}}{E_0}\right) - \exp\left(-\frac{E_{bn}}{E_0}\right) \right], \quad (10)$$

$$Q_{TMe} = Q'_{TMe} \left[\exp\left(-\frac{E_{b1}}{E_0}\right) - \exp\left(-\frac{E_{bn}}{E_0}\right) \right]. \quad (11)$$

Полагаем, что в начальный момент времени компоненты реакции (3) находятся в равновесном состоянии:

$$k_1 C_{Ti}^0 C_{M^+} = k_{2i} C_{MT_i^+}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Граничные условия принимались аналогичными граничным условиям модели для моноэнергетических ловушек [5] – отражение подвижных ионов примеси на МФГ и постоянное напряжение на затворе V_g :

$$j(0, t) = j(d, t) = 0; \quad (13)$$

$$V(d, t) = V_g, \quad (14)$$

где j – поток примесных ионов

$$\left(j(x, t) = -D \frac{\partial C_{M^+}}{\partial x} + \mu C_{M^+} E \right).$$

Сдвиг порогового напряжения при ТПО ΔV_{th} определяется выражением

$$\Delta V_{th}(t) = \frac{q}{C_{ox}} \int_0^d \left[(C_{M^+}(x, t) + C_{MT_i^+}(x, t)) - (C_{M^+}(x, 0) + C_{MT_i^+}(x, 0)) \right] \frac{d-x}{d} dx,$$

где $C_{ox} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d}$ – удельная емкость диэлектрика.

Результаты. Система уравнений модели (4)–(6) с начальными условиями (8)–(11), граничными условиями (13), (14) с учетом (7) и (12) решалась численно с использованием явных и неявных разностных схем. Подвижность ионов Na^+ в SiO_2 бралась по данным работы [12], в которой определялась методом термостимулированного ионного тока (TSIC), $\mu_0 = 1.05 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $E_a = 0.66 \text{ эВ}$. Число энергетических уровней ловушек n внутри диапазона задавалось не менее 30, тогда решение переставало зависеть от n . Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными из [4] и [13].

В [13] МОП-структура имела алюминиевый затвор, а подзатворный оксид создавался термическим окислением кремниевой подложки ориентации (100) при температуре 1150°C и имел толщину 120 нм. Структуры загрязнялись натрием в процессе напыления Al в количестве $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$. ТПО осуществлялась при температуре $\theta = 75, 120$ и 175°C при смещении затвора: $V_g = +2 \text{ В}$ – в режиме накопления заряда; $V_g = -1 \text{ В}$ – в режиме восстановления.

На рис. 1 представлены кинетики изменения порогового напряжения в режиме накопления при положительном смещении

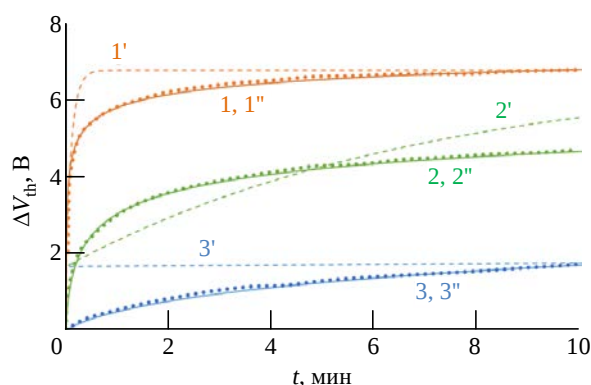


Рис. 1. Кинетики изменения порогового напряжения в режиме накопления при положительном смещении затвора для структур эксперимента [13]

Fig. 1. Kinetics of changes in threshold voltage in accumulation mode with positive gate bias for experimental structures [13]

положительном смещении затвора: экспериментальные [13] (кривые 1–3), рассчитанные при моноэнергетических ($Q_{M^+Me} = 1.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$;

$Q_{TMe} = 9.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; $E_b = 1.14 \text{ эВ}$) ловушках (кривые 1'–3') и при полиэнергетических ($Q_{M^+Me} = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; $Q_{TMe} = 6.09 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; $E_{b1} = 0.66 \text{ эВ}$; $E_{bn} = 1.4 \text{ эВ}$; $E_0 = 0.25 \text{ эВ}$) ловушках (кривые 1''–3''), расположенных у затвора. Ширина экспоненциального распределения вблизи затвора $L_{Me} = 2 \text{ нм}$ была выбрана исходя из того, что при отрицательном напряжении смещение порогового напряжения при ТПО не наблюдается (в данном случае смещение составляло всего $\Delta V_{th} = 3 \text{ мВ}$ при $\theta = 120^\circ\text{C}$, $V_g = -2 \text{ В}$). Ширина распределения ловушек у кремния принималась равной ширине распределения ловушек у затвора $L_{Si} = L_{Me} = 2 \text{ нм}$.

Как видно из рис. 1, расчет при моноэнергетических ловушках (кривые 1'–3') не позволяет описать эксперимент [13] (кривые 1–3), в то время как расчет при полиэнергетических ловушках (кривые 1''–3'') дает хорошее соответствие с экспериментальными зависимостями.

В [4] подзатворный оксид выращивался в сухом кислороде при температуре 1100°C и имел толщину 100 нм. Структуры загрязнялись перед металлизацией затвора выдержкой в концентрированном растворе хлорида натрия в количестве $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$. ТПО загрязненных образцов проводилась в широком диапазоне температур как для режима накопления при $V_g = +20 \text{ В}$, так и в режиме восстановления при $V_g = -1 \text{ В}$ ($32 \dots 120^\circ\text{C}$). "Чистые" образцы исследовались в режиме накопления при $V_g = +20 \text{ В}$ и $\theta = 220^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов при тех же энергетических параметрах ловушек у затвора ($E_{b1} = 0.66 \text{ эВ}$; $E_{bn} = 1.4 \text{ эВ}$; $E_0 = 0.25 \text{ эВ}$) сравнивались с экспериментом [4] при 120 и 220°C . На рис. 2 представлены кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме накопления для чистого ($\theta = 220^\circ\text{C}$; $\tau = 2000 \text{ с}$; $\Delta V_{th \max} = 5 \text{ В}$; $Q_{M^+Me} = 2.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) оксида (кривые 1, 1') и для загрязненного ($\theta = 120^\circ\text{C}$;

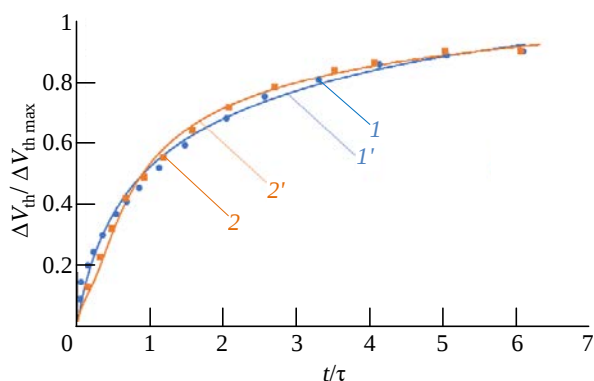


Рис. 2. Кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме накопления для чистого и загрязненного оксида для структур эксперимента [4]

Fig. 2. Kinetics of changes in relative threshold voltage in accumulation mode for pure and contaminated oxide for experimental structures [4]

$\tau = 40$ с; $\Delta V_{th\max} = 40$ В; $Q_{M^+Me} = 1.67 \cdot 10^{13}$ см⁻²) оксида (кривые 2, 2'): экспериментальные [4] (кривые 1, 2) и рассчитанные при полиэнергетических ($Q_{TMe} = 5.55 \cdot 10^{13}$ см⁻²) ловушках (кривые 1', 2').

Как видно из рис. 2, расчет при полиэнергетических ловушках (кривые 1', 2') достаточно хорошо описывает экспериментальные зависимости (кривые 1, 2).

Кинетика изменения порогового напряжения в режиме восстановления для структур эксперимента [13] при $V_g = -1$ В (после положительного смещения при $V_g = +2$ В, $\theta = 120$ °С, $t = 10$ мин) показана на рис. 3: кривая 1 – эксперимент [13], кривая 2 – расчет при тех же параметрах ловушек вблизи затвора, как и на рис. 1 без ловушек у кремния, кривая 3 – расчет при наличии полиэнергетических ловушек у кремния ($E_{b1} = 0.87$ эВ; $E_{bn} = 0.92$ эВ; $E_0 = 0.25$ эВ;

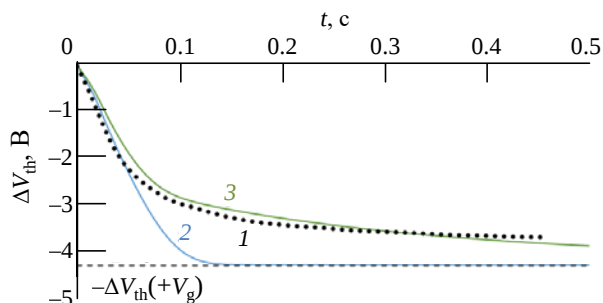


Рис. 3. Кинетика изменения порогового напряжения в режиме восстановления для структур эксперимента [13]

Fig. 3. Kinetics of changes in threshold voltage in recovery mode for experimental structures [13]

$$Q_{TSi} = 3.91 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}.$$

Как видно из рис. 3, расчет соответствует экспериментальной зависимости (кривая 1) при наличии полиэнергетических ловушек не только у затвора (кривая 2), но и у кремния (кривая 3) и с меньшей дисперсией по энергии.

На рис. 4 показаны кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме восстановления при $V_g = -1$ В (после положительного смещения до $\Delta V_{th\max} = 30$ В $\approx Q_{M^+Si} = 7 \cdot 10^{12}$ см⁻²) для различных температур (32, 42, 80 и 120 °С, $\tau = 110, 54, 2.1$ и 0.22 с соответственно): экспериментальные [4] (кривые 1–4) и расчетные (кривые 1'–4'). Расчет выполнен при таких же параметрах полиэнергетических ловушек у кремния, как и на рис. 3, кривая 3 ($E_{b1} = 0.87$ эВ; $E_{bn} = 0.92$ эВ; $E_0 = 0.25$ эВ, $Q_{TSi} = 2.68 \cdot 10^{12}$ см⁻²).

Как видно из рис. 4, расчет при наличии полиэнергетических ловушек у кремния (кривые 1'–4') с теми же параметрами, как на рис. 3, позволяет вполне удовлетворительно описать экспериментальные зависимости (кривые 1–4).

Обсуждение и выводы. Как видно из рис. 1 и 2, режим накопления подвижного заряда может быть описан посредством захвата ионов примеси не на моно-, а на полиэнергетические ловушки. Нижняя граница энергетического диапазона ловушек равна энергии активации подвижности $E_a = E_{b1} = 0.66$ эВ, определенной

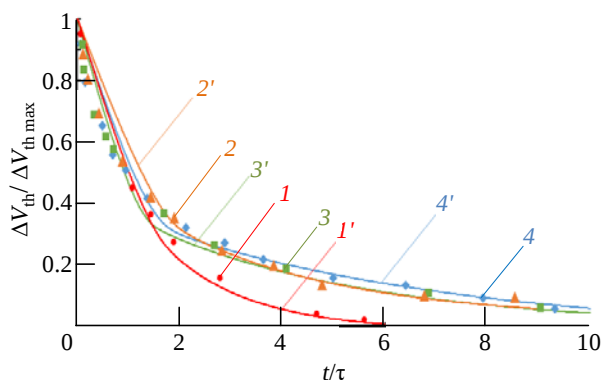


Рис. 4. Кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме восстановления при $V_g = -1$ В для различных температур для структур эксперимента [4]

Fig. 4. Kinetics of changes in relative threshold voltage in recovery mode at $V_g = -1$ V for different temperatures for experimental structures [4]

в [11]. Верхняя граница диапазона $E_{bn} = 1.4$ эВ равна наибольшей энергии активации, зафиксированной экспериментально для диффузии ионов натрия в [14]. Отметим, что полученный энергетический диапазон хорошо соотносится с энергетическим диапазоном для ионных ловушек, полученным в [15] (0.75...1.5 эВ).

Кинетики накопления заряда в "загрязненных" и "чистых" образцах описываются при одинаковой концентрации ловушек вблизи МФГ SiO_2 -затвор ($Q_{\text{TMe}} = 5.55 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$), что соотносится с тем, что образцы были изготовлены в одинаковых условиях окисления. В обоих случаях расчетные концентрации загрязняющих ионов натрия оказались близкими к экспериментальным параметрам ($Q_{N^+\text{Me}} = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ($\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в [13]) на рис. 1 и $Q_{N^+\text{Me}} = 1.67 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в [4]) на рис. 3.

Режим восстановления происходит значительно быстрее, чем режим накопления (асимметричное поведение). На зависимостях рис. 3 и 4 можно видеть две области. Начальная область быстрого падения обусловлена дрейфом примеси от МФГ Si-SiO_2 , угол ее наклона характеризуется подвижностью свободной примеси. Последующая пологая область обусловлена захватом ионов примеси на ловушки вблизи затвора (см. рис. 3, кривая 2), а также на ловушки у границы с кремнием (см. рис. 3, кривая 3, рис. 4, кривые 1'-4'). Среди литературных данных для подвижности свободного натрия в термическом SiO_2 (приведены в [5]) только данные [11] соотносятся с модельными расчетами. Значение $E_{b1} = 0.87$ эВ, полученное для ловушек вблизи МФГ Si-SiO_2 , достаточно хорошо соотносится с энергиями активации ионов Na^+ , определенными в [16, 17].

Асимметрия зависимостей на рис. 1–3 и 2–4 в рамках модели объясняется начальным расположением ионов Na^+ на ловушках вблизи затвора, а также различными параметрами полиэнергетических ловушек вблизи МФГ SiO_2 -затвор ($E_{b1} = 0.66$ эВ; $E_{bn} = 1.4$ эВ) и вблизи МФГ Si-SiO_2 ($E_{b1} = 0.87$ эВ; $E_{bn} = 0.92$ эВ).

Отметим, что в режимах накопления и восстановления заряда для полиэнергетических

ловушек получена одинаковая характеристическая энергия $E_0 = 0.25$ эВ. Это свидетельствует об одинаковой природе ловушек захвата ионов примеси в подзатворном оксиде вблизи обеих МФГ: SiO_2 -затвор и SiO_2 -кремний.

Уменьшение диапазона энергий связи ионов Na с ловушками вблизи МФГ SiO_2 -Si (0.87...0.92 эВ) по сравнению с МФГ SiO_2 -затвор (0.66...1.4 эВ) можно связать с упорядочением аморфной структуры термического SiO_2 вблизи кремниевой подложки в слое с расчетной шириной экспоненциального распределения $L = 2$ нм. Такая ширина соответствует толщине переходного слоя между стехиометрическим аморфным SiO_2 , полученным термическим окислением, и монокристаллической Si-подложкой. В переходном слое состав SiO_x меняется от $x = 2$ в SiO_2 , через $x = 1.5$, 1 и 0.5 до $x = 0$ в Si [18]. По данным [19] переходный слой имеет повышенную плотность ($\rho = 2.35...2.4 \text{ г/см}^3$) по сравнению с аморфным SiO_2 ($\rho = 2.3 \text{ г/см}^3$), его толщина оценивается 0.5...2 нм [20–23]. В ранних работах указывалось на наличие в переходном слое кристаллической фазы β -кристобалита [24], α -кристобалита [25] или тридимита [26]. В более поздних работах [27–30] приводятся доказательства упорядоченного эпитаксиального роста похожего на кристаллитный (crystalite-like) оксида кремния в слое толщиной 2...3 нм. В [31] предложена, а в [32] подтверждена модель роста упорядоченной соединенной мостом интерфейсной (bridge-bonded interface) структуры без какой-либо кристаллической объемной фазы. Полученные авторами данные по уменьшению диапазона энергии связи подтверждают наличие тонкого слоя в оксиде вблизи МФГ с кремнием с более упорядоченной структурой, чем в оксиде у внешней МФГ вблизи затвора.

Таким образом, разработанная количественная модель, основанная на механизме многократного захвата подвижных ионов примеси полиэнергетическими ловушками в объеме аморфного подзатворного диэлектрика, позволяет описать асимметричное поведение МОП-структур при ТПО в режимах накопления и восстановления подвижного заряда.

Список литературы

1. Bias temperature instability for devices and circuits / Ed. by T. Grassler. New York: Springer, 2013. 810 p.
doi: 10.1007/978-1-4614-7909-3
2. Bias temperature instability of MOSFETs: physical processes, models and prediction / J. F. Zhang, R. Gao, M. Duan, Z. Ji, W. Zhang, J. Marsland // *Electronics*. 2022. Vol. 11, iss. 9. Art. № 1420.
doi: 10.3390/electronics11091420
3. Ion transport phenomena in insulating films / E. H. Snow, A. S. Grove, B. E. Deal, C. T. Sah // *J. of Applied Physics*. 1965. Vol. 36, № 5. P. 1664–1673.
doi: 10.1063/1.1703105
4. Hofstein S. R. An investigation of instability and charge motion in metal-silicon oxide-silicon structures // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1966. Vol. ED-13, iss. 2. P. 222–237.
doi: 10.1109/T-ED.1966.15674
5. Александров О. В., Морозов Н. Н. Влияние ловушек на накопление подвижного заряда в МОП-структурах при термополевых обработках // *Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ"*. 2023. Т. 16, № 6. С. 20–28.
doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-20-28
6. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Система кремний–диоксид кремния субмикронных СБИС. М.: Техносфера, 2003. 383 с.
7. Scher H., Montroll E. W. Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids // *Physical Review B*. 1975. Vol. 12, № 6. Art. № 2455.
doi: 10.1103/PhysRevB.12.2455
8. Curtis Jr O. L., Srouf J. R. The multiple trapping model and hole transport in SiO₂ // *J. of Applied Physics*. 1977. Vol. 48, № 9. P. 3819–3828.
doi: 10.1063/1.324248
9. Schmidlin F. W. Theory of multiple trapping // *Solid State Communications*. 1977. Vol. 22, iss. 7. P. 451–453.
doi: 10.1016/0038-1098(77)90123-5
10. Noolandi J. Equivalence of multiple-trapping model and time-dependent random walk // *Physical Review B*. 1977. Vol. 16, № 10. Art. № 4474.
doi: 10.1103/PhysRevB.16.4474
11. Архипов В. И., Никитенко В. Р. Дисперсионный транспорт в материалах с немонотонным энергетическим распределением локализованных состояний // *Физика и техника полупроводников*. 1989. Т. 23, № 6. С. 978–984.
12. Stagg J. P. Drift mobilities of Na⁺ and K⁺ ions in SiO₂ films // *Applied Physics Lett.* 1977. Vol. 31, № 8. P. 532–533.
doi: 10.1063/1.89766
13. Kriegl R. J., Devenyi T. F. Temperature-bias aging of (HCl) MOS structures // *11th Reliability Physics Symp. Las Vegas, USA, 03–05 Apr. 1973. IEEE*, 1973. P. 153–158.
doi: 10.1109/IRPS.1973.362587
14. Ordered structure and ion migration in silicon dioxide films / T. Sugano, K. Hoh, K. Kudo, N. Hishinuma // *Japan. J. Appl. Phys.* 1968. Vol. 7, № 7. P. 715–730.
doi: 10.1143/JJAP.7.715
15. Boudry M. R., Stagg J. P. The kinetic behavior of mobile ions in the Al–SiO₂–Si system // *J. of Applied Physics*. 1979. Vol. 50, № 2. P. 942–950.
doi: 10.1063/1.326016
16. Hickmott T. W. Thermally stimulated ionic conductivity of sodium in thermal SiO₂ // *J. of Applied Physics*. 1975. Vol. 46, № 6. P. 2583–2598.
doi: 10.1063/1.321935
17. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Транспорт свободных ионов в слое диэлектрика и эффекты электронно-ионного обмена у межфазной границы диэлектрик–полупроводник при термостимулированной ионной деполяризации кремниевых МОП-структур // *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33, № 8. С. 962–968.
18. Chemical structure of the ultrathin SiO₂/Si(100) interface: An angle-resolved Si 2p photoemission study / J. H. Oh, H. W. Yeom, Y. Hagimoto, K. Ono, M. Oshima, N. Hirashita, M. Nywa, A. Toriumi, A. Kakizaki // *Physical Review B*. 2001. Vol. 63, № 20. Art. № 205310.
doi: 10.1103/PhysRevB.63.205310
19. Structural fluctuation of SiO₂ network at the interface with Si / Y. Sugita, S. Watanabe, N. Awaji, S. Komiyama // *Applied Surface Science*. 1996. Vol. 100–101. P. 268–271.
doi: 10.1016/0169-4332(96)00302-9
20. Стадии формирования границы раздела кремния с термическим окислом / В. В. Монахов, О. В. Романов, С. Н. Кириллов, В. Я. Урицкий, В. А. Смирнов // *Физика и техника полупроводников*. 1986. Т. 20, № 3. С. 477–480.
21. Infrared studies of transition layers at SiO₂/Si interface / H. Ono, T. Ikarashi, K. Ando, T. Kitano // *J. of Applied Physics*. 1998. Vol. 84, № 11. P. 6064–6069.
doi: 10.1063/1.368917
22. Kimura K., Nakajima K. Compositional transition layer in SiO₂/Si interface observed by high-resolution RBS // *Applied surface science*. 2003. Vol. 216, № 1–4. P. 283–286.
doi: 10.1016/S0169-4332(03)00386-6
23. Transition Structure at the Si (100)–SiO₂ Interface / A. Bongiorno, A. Pasquarello, M. S. Hybertsen, L. C. Feldman // *Physical Review Lett.* 2003. Vol. 90, № 18. Art. № 186101.
doi: 10.1103/PhysRevLett.90.186101
24. Smith F. W., Ghidini G. Reaction of oxygen with Si (111) and (100): critical conditions for the growth of SiO₂ // *J. of the Electrochemical Society*. 1982. Vol. 129, № 6. Art. № 1300.
doi: 10.1149/1.2124122
25. X-ray scattering studies of the Si–SiO₂ interface / P. H. Fuoss, Paul H. Fuoss, L. J. Norton, S. Brennan, A. Fischer-Colbrie // *Physical Review Lett.* 1988. Vol. 60, № 7. P. 600–603.
doi: 10.1103/PhysRevLett.60.600

26. Ourmazd A., Taylor D. W., Rentschler J. A. Si→ SiO₂ transformation: interfacial structure and mechanism // *Physical Review Let.* 1987. Vol. 59, № 2. Art. № 213.

doi: 10.1103/PhysRevLett.59.213

27. Observation of a Distributed Epitaxial Oxide in Thermally Grown SiO₂ on Si (001) / A. Munkholm, S. Brennan, F. Comin, L. Ortega // *Physical Review Let.* 1995. Vol. 75, № 23. Art. № 4254.

doi: 10.1103/PhysRevLett.75.4254

28. X-ray diffraction evidence for the existence of epitaxial microcrystallites in thermally oxidized SiO₂ thin films on Si (111) surfaces / T. Shimura, H. Misaki, M. Umeno, I. Takahashi, J. Harada // *J. of Crystal Growth.* 1996. Vol. 166, № 1–4. P. 786–791.

doi: 10.1016/0022-0248(95)00496-3

29. In situ observation of epitaxial microcrystals in thermally grown SiO₂ on Si (100) / N. Awaji, Y. Sugita,

Y. Horii, I. Takahashi // *Applied Physics Let.* 1999. Vol. 74, № 18. P. 2669–2671.

doi: 10.1063/1.123953

30. Ikarashi N., Watanabe K., Miyamoto Y. High-resolution transmission electron microscopy of an atomic structure at a Si (001) oxidation front // *Physical Review B.* 2000. Vol. 62, № 23. Art. № 15989.

doi: 10.1103/PhysRevB.62.15989

31. Tu Y., Tersoff J. Structure and energetics of the Si-SiO₂ interface // *Physical Review Let.* 2000. Vol. 84, № 19. Art. № 4393.

doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4393

32. Dreiner S., Schürmann M., Westphal C. Structural Analysis of the SiO₂/Si (100) Interface by Means of Photoelectron Diffraction // *Physical Review Let.* 2004. Vol. 93, № 12. Art. № 126101.

doi: 10.1103/PhysRevLett.93.126101

Информация об авторах

Александров Олег Викторович – доктор физико-математических наук (2003), профессор (2008) кафедры электронного приборостроения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 150 научных работ. Сфера научных интересов – диффузионное и ионное легирование полупроводников; сегрегация примесей на межфазных границах; физика МОП-структур.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: Aleksandr_ov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-1016-1031>

Морозов Никита Николаевич – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2022, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант и ассистент кафедры электронного приборостроения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – поведение МОП-структур при термополевых обработках; физика переноса подвижных ионов в аморфных диэлектриках.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: laughter-maiden@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-3655-4860>

References

1. Bias Temperature Instability for Devices and Circuits. Ed. by T. Grassler. New York, Springer, 2013, 810 p. doi: 10.1007/978-1-4614-7909-3

2. Zhang J. F., Gao R., Duan M., Ji Z., Zhang W., Marsland J. Bias Temperature Instability of MOSFETs: Physical Processes, Models and Prediction. *Electronics.* 2022, vol. 11, iss. 9, art. no. 1420. doi: 10.3390/electronics11091420

3. Snow E. H., Grove A. S., Deal B. E., Sah C. T. Ion Transport Phenomena in Insulating Films. *J. of Applied Physics.* 1965, vol. 36, no. 5, pp. 1664–1673. doi: 10.1063/1.1703105

4. Hofstein S. R. An Investigation of Instability and Charge Motion in Metal-Silicon Oxide-Silicon Structures. *IEEE Transactions on Electron Devices.* 1966, vol. ED-13, iss. 2, pp. 222–237. doi: 10.1109/T-ED.1966.15674

5. Aleksandrov O. V., Morozov N. N. Influence of Traps on Mobile Charge Accumulation in MOS Structures in Thermal Field Treatments. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science.* 2023, vol. 16, no. 6, pp. 20–28.

doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-20-28

6. Krasnikov G. Ya., Zaitsev N. A. *Sistema kremni-dioksid kremniya submikronnykh SBIS* [Silicon-Silicon Dioxide System of Submicron VLSI]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2003, 383 p. (In Russ.)

7. Scher H., Montroll E. W. Anomalous Transit-Time Dispersion in Amorphous Solids. *Physical Review B.* 1975, vol. 12, no. 6, art. no. 2455. doi: 10.1103/PhysRevB.12.2455

8. Curtis Jr O. L., Srour J. R. The Multiple Trapping Model and Hole Transport in SiO₂. *J. of Applied Physics.* 1977, vol. 48, no. 9, pp. 3819–3828. doi: 10.1063/1.324248

9. Schmidlin F. W. Theory of Multiple Trapping. Solid State Communications. 1977, vol. 22, iss. 7, pp. 451–453. doi: 10.1016/0038-1098(77)90123-5
10. Noolandi J. Equivalence of Multiple-Trapping Model and Time-Dependent Random Walk. Physical Review B. 1977, vol. 16, no. 10, art. no. 4474. doi: 10.1103/PhysRevB.16.4474
11. Arkhipov V. I., Nikitenko V. R. Dispersion Transport in Materials with Non-Monotonic Energy Distribution of Localized States. Physics and Technology of Semiconductors. 1989, vol. 23, no. 6, pp. 978–984. (In Russ.)
12. Stagg J. P. Drift Mobilities of Na^+ and K^+ Ions in SiO_2 Films. Applied Physics Lett. 1977, vol. 31, no. 8, pp. 532–533. doi: 10.1063/1.89766
13. Krieger R. J., Devenyi T. F. Temperature-Bias Aging of (HCl) MOS Structures. 11th Reliability Physics Symp. Las Vegas, USA, 03–05 Apr. 1973. IEEE, 1973, pp. 153–158. doi: 10.1109/IRPS.1973.362587
14. Sugano T., Hoh K., Kudo K., Hishinuma N. Ordered Structure And Ion Migration In Silicon Dioxide Films. Japan. J. Appl. Phys. 1968, vol. 7, no. 7, pp. 715–730. doi: 10.1143/JJAP.7.715
15. Boudry M. R., Stagg J. P. The Kinetic Behavior of Mobile Ions in the Al– SiO_2 –Si System. J. of Applied Physics. 1979, vol. 50, no. 2, pp. 942–950. doi: 10.1063/1.326016
16. Hickmott T. W. Thermally Stimulated Ionic Conductivity of Sodium in Thermal SiO_2 . J. of Applied Physics. 1975, vol. 46, no. 6, pp. 2583–2598. doi: 10.1063/1.321935
17. Goldman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. Transport of Free Ions in a Dielectric Layer and Effects of Electron-Ion Exchange at the Dielectric-Semiconductor Interface during Thermally Stimulated Ion Depolarization of Silicon MOS Structures. Physics and Technology of Semiconductors. 1999, vol. 33, no. 8, pp. 962–968. (In Russ.)
18. Oh J. H., Yeom H. W., Hagimoto Y., Ono K., Oshima M., Hirashita N., Nywa M., Toriumi A., Kakizaki A. Chemical Structure of the Ultrathin $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ Interface: An Angle-Resolved Si 2p Photoemission Study. Physical Review B. 2001, vol. 63, no. 20, art. no. 205310. doi: 10.1103/PhysRevB.63.205310
19. Sugita Y., Watanabe S., Awaji N., Komiya S. Structural Fluctuation of SiO_2 Network at the Interface with Si. Applied Surface Science. 1996, vol. 100–101, pp. 268–271. doi: 10.1016/0169-4332(96)00302-9
20. Monakhov V. V., Romanov O. V., Kirillov S. N., Uritskii V. Ya., Smirnov V. A. Stages of Formation of the Interface between Silicon and Thermal Oxide. Physics and Technology of Semiconductors. 1986, vol. 20, no. 3, pp. 477–480. (In Russ.)
21. Ono H., Ikarashi T., Ando K., Kitano T. Infrared Studies of Transition Layers at SiO_2/Si Interface. J. of Applied Physics. 1998, vol. 84, no. 11, pp. 6064–6069. doi: 10.1063/1.368917
22. Kimura K., Nakajima K. Compositional Transition Layer in SiO_2/Si Interface Observed by High-Resolution RBS. Applied Surface Science. 2003, vol. 216, no. 1–4, pp. 283–286. doi: 10.1016/S0169-4332(03)00386-6
23. Bongiorno A., Pasquarello A., Hybertsen M. S., Feldman L. C. Transition Structure at the Si (100)– SiO_2 Interface. Physical Review Lett. 2003, vol. 90, no. 18, art. no. 186101. doi: 10.1103/PhysRevLett.90.186101
24. Smith F. W., Ghidini G. Reaction of Oxygen with Si (111) and (100): Critical Conditions for the Growth of SiO_2 . J. of the Electrochemical Society. 1982, vol. 129, no. 6, art. no. 1300. doi: 10.1149/1.2124122
25. Fuoss P. H., Fuoss Paul H., Norton L. J., Brennan S., Fischer-Colbrie A. X-ray Scattering Studies of the Si– SiO_2 Interface. Physical Review Lett. 1988, vol. 60, no. 7, pp. 600–603. doi: 10.1103/PhysRevLett.60.600
26. Ourmazd A., Taylor D. W., Rentschler J. A. Si→ SiO_2 Transformation: Interfacial Structure and Mechanism. Physical Review Lett. 1987, vol. 59, no. 2, art. no. 213. doi: 10.1103/PhysRevLett.59.213
27. Munkholm A., Brennan S., Comin F., Ortega L. Observation of a Distributed Epitaxial Oxide in Thermally Grown SiO_2 on Si (001). Physical Review Lett. 1995, vol. 75, no. 23, art. no. 4254. doi: 10.1103/PhysRevLett.75.4254
28. Shimura T., Misaki H., Umeno M., Takahashi I., Harada J. X-ray Diffraction Evidence for the Existence of Epitaxial Microcrystallites in Thermally Oxidized SiO_2 Thin Films on Si (111) Surfaces. J. of Crystal Growth. 1996, vol. 166, no. 1–4, pp. 786–791. doi: 10.1016/0022-0248(95)00496-3
29. Awaji N., Sugita Y., Horii Y., Takahashi I. In Situ Observation of Epitaxial Microcrystals in Thermally Grown SiO_2 on Si (100). Applied Physics Lett. 1999, vol. 74, no. 18, pp. 2669–2671. doi: 10.1063/1.123953
30. Ikarashi N., Watanabe K., Miyamoto Y. High-Resolution Transmission Electron Microscopy of an Atomic Structure at a Si (001) Oxidation Front. Physical Review B. 2000, vol. 62, no. 23, art. no. 15989. doi: 10.1103/PhysRevB.62.15989
31. Tu Y., Tersoff J. Structure and Energetics of the Si– SiO_2 Interface. Physical Review Lett. 2000, vol. 84, no. 19, art. no. 4393. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4393
32. Dreiner S., Schürmann M., Westphal C. Structural Analysis of the SiO_2/Si (100) Interface by Means of Photoelectron Diffraction. Physical Review Lett. 2004, vol. 93, no. 12, art. no. 126101. doi: 10.1103/PhysRevLett.93.126101

Information about the authors

Oleg V. Aleksandrov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2003), Professor (2008) of the Department of Electronic Instrumentation of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 150 scientific publications. Area of expertise: diffusion and ion doping of semiconductors; segregation of impurities at interphase boundaries; physics of MOS structures.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: Aleksandr_ov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-1016-1031>

Nikita N. Morozov, Master's degree in Electronics and Nanoelectronics (2022, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student and assistant of the Department of Electronic Instrumentation of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: behavior of MOS structures during thermal field treatments; physics of transport of mobile ions in amorphous dielectrics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: laughter-maiden@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-3655-4860>

Модульный дизайн интерфейсов в наноструктурах из квазикристаллических блоков

А. Е. Мадисон^{1✉}, П. А. Мадисон^{1,2}, В. А. Мошников², А. В. Соломонов²

¹Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",
Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ alex_madison@mail.ru

Аннотация

Введение. Аперидический порядок открывает перспективы для создания новых материалов и структур с необычными свойствами. В настоящее время ведутся активные исследования с целью создания новых материалов из неатомарных строительных блоков, материалов и элементов на основе аперидических детерминированных структур, фотонных кристаллов и квазикристаллов, метаматериалов. При отсутствии аналогов в природе важную роль приобретает выработка теоретических принципов для целенаправленного рационального дизайна подобных структур. Важным требованием является объединение субъединиц и строительных блоков в сложную иерархическую наноструктуру таким образом, чтобы локальный порядок при переходе через интерфейсные области менялся незначительно. Одним из вариантов решения этой проблемы является эпитаксиальное соответствие между отдельными слоями наноструктуры. Более сложные структуры строятся на принципах модульного дизайна. Ранее принципы модульного дизайна к квазикристаллическим структурам не применялись.

Цель работы. Применение общих принципов модульного дизайна к иерархическим структурам, содержащим квазикристаллические блоки.

Материалы и методы. Строение икосаэдрических квазикристаллов изучалось методами компьютерного моделирования в рамках концепции элементарных ячеек. Модульный дизайн интерфейсов основывался на предварительном построении трехмерной икосаэдрической упаковки с последующим вырезанием из нее двумерных фрагментов, пересекающихся по общим цепочкам эквивалентных узлов. Слои, вырезанные из квазикристаллических упаковок перпендикулярно осям симметрии икосаэдра, содержат близкие по структуре фрагменты из идентичных субъединиц, разделенных чередующимися длинными и короткими промежутками в соответствии с LS-последовательностью Фибоначчи. Проецирование элементов икосаэдрической структуры на ломаную поверхность обеспечивает когерентную "сшивку" фрагментов с различной симметрией при модульном дизайне наноструктур из квазикристаллических блоков.

Результаты. Показана возможность когерентной "сшивки" фрагментов с различной симметрией при модульном дизайне наноструктур из квазикристаллических блоков, которые в рамках классического рассмотрения представляются несовместимыми.

Заключение. Представлены примеры "сшивки" чередующихся слоев с симметрией второго, третьего и пятого порядков в единую иерархическую наноструктуру без существенного нарушения локального порядка при переходе через интерфейсные области.

Ключевые слова: наноструктуры, квазикристаллы, модульный дизайн, границы раздела, икосаэдрическая симметрия

Для цитирования: Модульный дизайн интерфейсов в наноструктурах из квазикристаллических блоков / А. Е. Мадисон, П. А. Мадисон, В. А. Мошников, А. В. Соломонов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 80–93.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-80-93

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 23-23-00392, <https://rscf.ru/project/23-23-00392/>.

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; принята к публикации после рецензирования 14.03.2025; опубликована онлайн 30.04.2025

Modular Design of Interfaces in Nanostructures from Quasicrystalline Blocks

Alexey E. Madison^{1✉}, Pavel A. Madison^{1,2},
Vyacheslav A. Moshnikov², Alexander V. Solomonov²

¹HSE University, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ alex_madison@mail.ru

Abstract

Introduction. Aperiodic order offers the possibility of creating new materials and structures with nonstandard properties. Active research is currently underway to obtain materials from non-atom building blocks, materials and elements based on aperiodic deterministic structures, photonic crystals and quasicrystals, and metamaterials. In the absence of natural analogues, the development of theoretical principles for the targeted rational design of their structures plays an important role. An important requirement consists in combining subunits and building blocks into a complex hierarchical nanostructure such that the local order would change only slightly when passing through interface regions. A possible solution to this problem is epitaxial matching between individual layers of the nanostructure. More complex structures are built on the principles of modular design. Previously, the principles of modular design have not been applied to quasicrystalline structures.

Aim. Apply the general principles of modular design to hierarchical structures containing quasicrystalline blocks.

Materials and methods. The structure of icosahedral quasicrystals was studied by computer simulation within the unit cell concept. The modular design of interfaces was based on the preliminary construction of a 3D icosahedral packing followed by cutting out those 2D fragments that intersect along common chains of equivalent nodes. The layers cut from quasicrystalline packings perpendicular to the symmetry axes of the icosahedron contain structurally similar fragments of identical subunits, separated by alternating long and short spaces in accordance with the LS Fibonacci sequence. Projection of icosahedral structure elements onto a kinked surface provides a coherent cross-linking of fragments with different symmetries by using the modular design of nanostructures from quasicrystalline blocks.

Results. The possibility of coherent cross-linking of fragments with different symmetries, which appears to be incompatible from the standpoint of classical theory, using the modular design of nanostructures from quasicrystalline blocks is confirmed.

Conclusion. Examples of cross-linking of alternating layers with 2, 3, and 5-fold symmetries into a single hierarchical nanostructure without a significant violation of the local order when passing through interface regions are presented.

Keywords: nanostructures, quasicrystals, modular design, interfaces, icosahedral symmetry

For citation: Madison A. E., Madison P. A., Moshnikov V. A., Solomonov A. V. Modular Design of Interfaces in Nanostructures from Quasicrystalline Blocks. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 80–93. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-80-93

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 23-23-00392, <https://rscf.ru/project/23-23-00392/>.

Submitted 27.01.2025; accepted 14.03.2025; published online 30.04.2025

Введение. Открытие квазикристаллов Шехтманом [1] привело к изменению одной из ключевых парадигм в физике конденсированного состояния. В понятие кристалла теперь включаются не только периодические решетки, но и аperiodические структуры, характеризующиеся существенно дискретной дифракционной картиной. Строгое математическое определение квазикристалла было дано Дайсоном: "Ква-

зикристалл – это распределение дискретных точечных масс, фурье-преобразование которых есть распределение дискретных точек в частотном (обратном) пространстве. Еще короче, квазикристалл – это чисто точечное распределение с чисто точечным спектром. Это определение включает в себя в качестве частного случая и обычные кристаллы как периодические распределения с периодическими спектрами" [2].

Например, распределение нетривиальных нулей дзета-функции Римана вдоль критической линии является одномерным квазикристаллом по определению, если гипотеза Римана верна. Столь кардинальное расширение понятия кристаллического состояния делает актуальным поиск возможных применений аperiодических структур всюду, где традиционно использовались периодические кристаллы.

Это значит, что всюду, где в электротехническом материаловедении традиционно использовались и используются кристаллические материалы, теперь могут применяться и материалы квазикристаллические. Цель настоящей статьи – представить критический обзор наиболее перспективных, на взгляд авторов, применений квазикристаллов и вытекающих из этого фундаментальных задач. Также в статье приводятся практические результаты использования принципов модульного дизайна для инжиниринга иерархических структур, содержащих квазикристаллические блоки.

Перспективные применения квазикристаллов в электротехническом и полупроводниковом материаловедении. Икосаэдрические квазикристаллы были впервые обнаружены при исследовании многокомпонентных металлических сплавов, и большинство синтезированных к настоящему времени квазикристаллов также обладает металлическим типом проводимости. Однако типичные значения удельного сопротивления при комнатной температуре для них находятся в диапазоне 100...15 000 мкОм·см, что соответствует нижним значениям области полупроводниковых материалов на границе с проводниками. При этом удельное сопротивление уменьшается с ростом температуры и возрастает с увеличением структурного совершенства, особенно в области низких температур, что характерно для стандартных кристаллических полупроводников [3]. Они характеризуются также низкой теплопроводностью и малыми значениями поверхностной адгезии и коэффициента трения. В совокупности с низкой теплопроводностью икосаэдрические квазикристаллы и материалы на их основе могут обладать достаточно высоким коэффициентом Зеебека, что делает их перспективными материалами для термоэлектрических устройств [4]. Особый интерес пред-

ставляют магнитные квазикристаллические материалы на базе переходных и/или редкоземельных элементов [5, 6]. Квазикристаллы могут обладать сверхпроводимостью [7].

Актуальной задачей является поиск квазикристаллических материалов с полупроводниковыми свойствами, среди которых в первую очередь следует упомянуть материалы на основе соединений бора [8]. В системах с высоким содержанием бора атомы образуют характерный структурный мотив из иерархически упорядоченных икосаэдрических кластеров B_{12} . Структуры в целом реализуются либо как икосаэдрические квазикристаллы, либо как их кристаллические аппроксиманты. Такие материалы как правило демонстрируют полупроводниковые свойства [9, 10].

Второе важное направление при поиске новых квазикристаллических полупроводников связано с исследованием сверхпрочных алмазоподобных материалов со структурами BC8 и R8. Первоначально такие структуры были обнаружены как метастабильные фазы кремния [11]. В основе структуры BC8 (пространственная группа $Ia\bar{3}$) лежит объемно-центрированная кубическая решетка с 8 атомами на элементарную ячейку. Ромбоэдрическую структуру R8 (пространственная группа $R\bar{3}$) можно рассматривать как искаженную BC8. Для обеих структур характерна тетраэдрическая координация атомов. Дмитриенко и Клеман показали, что позиции всех атомов Si в структуре BC8 можно получить проецированием из шестимерной кубической решетки. Если внутри кубической элементарной ячейки вписать икосаэдр, то 3/4 связей будут направлены почти в точности вдоль осей симметрии 5-го порядка [12]. Иными словами, структуру BC8 можно рассматривать как 1/1-аппроксимант гипотетического однокомпонентного икосаэдрического квазикристалла I-типа. Аналогичной структурой обладает предсказанная недавно новая сверхтвердая модификация алмазоподобного углерода, стабильная при высоких давлениях [13]. Активное внимание уделяется необычным модификациям твердых растворов Si–Ge [14]. Особый интерес представляют двухкомпонентные и трехкомпонентные химические соединения в системах B–C, B–N и B–C–N [15].

Еще одно важное направление связано с исследованием микро- и нанокристаллических форм алмаза с пентагональной и икосаэдрической симметрией [16, 17]. Прямые экспериментальные доказательства существования икосаэдрических форм наноалмазов приведены в [18, 19]. Их строение объясняется как результат множественного двойникового тетраэдров кубического алмаза через прослойки его гексагональной аллотропной модификации. Одно из возможных применений подобных структур – создание икосаэдрических квантовых точек для полупроводников IV группы и их изоэлектронных аналогов. Икосаэдрические алмазы могут достигать размеров ~ 1 мкм. Возникает вопрос: может ли аналогичный принцип быть положен в основу гипотетической структуры квазикристалла макроскопических размеров?

Чрезвычайно перспективное направление исследований физики полупроводников связано с возможностью топологического перехода металл–диэлектрик в квазикристаллах [20]. Согласно классической теории, если энергетические зоны заселены электронами частично, то соответствующий материал обладает металлической проводимостью. Наоборот, если зоны либо полностью заполнены, либо пусты, то соответствующий материал будет диэлектриком или полупроводником. Однако материалы с частично заполненными зонами могут быть диэлектриками вопреки упрощенной трактовке. Возможны различные механизмы топологических переходов: Мотта, Кондо, Пайерлса. Например, в соединениях переходных и редкоземельных металлов сильное локальное кулоновское взаимодействие между электронами, занимающими узкие d - и f -зоны, приводит к значительному обменному расщеплению и формированию запрещенной зоны вблизи уровня Ферми, превращая металл в изолятор Мотта.

В [21] отмечается, что большинство известных на сегодняшний день квазикристаллов обладают отрицательным температурным коэффициентом удельного сопротивления, высоким остаточным сопротивлением, магнеторезистивным эффектом наподобие легированных полупроводников. Экспериментальные исследования явлений переноса в образцах икосаэдрических квазикристаллов i -Al–Pd–Re высокой степени совершенства, как и

результаты расчета зонной структуры из первых основополагающих принципов (*ab initio*), свидетельствуют в пользу предположения, что большинство квазикристаллов на основе сплавов алюминия и переходных металлов обладают узкой запрещенной зоной вблизи уровня Ферми вследствие топологического перехода, истинный физический механизм которого остается не до конца выясненным. В [21] отмечается, что квазикристаллы и их кристаллические аппроксиманты в системах Al–Pd–Re, Al–Pd–Mn, Al–Re–Si обладают свойствами, промежуточными между тремя основными типами твердых тел: металлами, ковалентными полупроводниками и молекулярными кристаллами, а также обсуждаются перспективы поиска борсодержащих аналогов этих соединений.

Квазикристаллические материалы из неатомарных строительных блоков. Крёмер в своей Нобелевской лекции формулирует так называемую *лемму новых технологий*: "Основные области применения любой, достаточно новой инновационной технологии всегда были (и будут) порождены самой этой технологией" [22]. Нередко для этого требуются время и серьезные усилия при проведении фундаментальных и прикладных исследований в смежных областях. Использование аперидического порядка открывает широкие перспективы при создании новых материалов и структур с необычными свойствами. Выделим направления, где использование аперидических структур, по мнению авторов, может привести к значительному прогрессу.

В настоящее время ведутся активные исследования с целью создания новых материалов из неатомарных строительных блоков [23, 24], материалов и элементов на основе аперидических детерминированных структур [25], фотонных и фононных кристаллов и квазикристаллов, а также метаматериалов [26–30]. Особый интерес вызывают квазикристаллы с отрицательным и близким к нулю коэффициентом преломления [31], вплоть до возможности достижения эффекта оптического маскирования – так называемого эффекта шапки-невидимки [32].

Особый интерес представляют эффекты локализации света в фотонных квазикристаллах [33–35]. Важные практические применения могут иметь фотонные квазикристаллы с полной шириной запрещенной зоны [36].

В частности, в случае квазикристаллических структур фотонная запрещенная зона значительно более изотропна, что является преимуществом при использовании их в качестве высокоэффективных изотропных источников теплового излучения. Излучение с частотами выше и ниже границ фотонной запрещенной зоны соответствует модам, которые могут распространяться через фотонный кристалл. Наличие локализованных мод можно использовать для дизайна лазерных систем с необычным распределением светового поля.

Принципы теоретического описания дальнего порядка в икосаэдрических квазикристаллах и методы дизайна новых структур. При отсутствии структурных аналогов в природе важную роль приобретает разработка теоретических принципов для целенаправленного рационального дизайна подобных структур [37]. Предсказание возможных термодинамически стабильных аperiодических структур и объяснение их потенциальных свойств – далеко не тривиальные задачи. Зона Бриллюэна в классическом понимании – это многогранник Вороного обратной решетки, а волновые функции Блоха (плоские волны) – собственные функции (инфинитезимального) оператора трансляции. Очевидно, что для квазикристаллов волновые функции Блоха не являются собственными функциями гамильтониана системы. Говоря о предсказании существования и стабильности (всех) возможных квазикристаллов и их кристаллических аппроксимантов, Штойрер отмечает: "Серьезной сложностью квантово-механических расчетов станет отсутствие периодических граничных условий" [38].

Современные методы описания структуры квазикристаллов базируются на многомерном подходе (методе вырезания и проецирования) [39]. В рамках этого подхода сначала вычисляют некую квазикристаллическую функцию плотности как результат фурье-синтеза. При этом число базисных векторов обратного пространства больше размерности физического пространства. В качестве исходных данных используются экспериментально измеренные интенсивности дифракционных рефлексов. Затем определенным образом выбранный срез полученного распределения проецируется на реаль-

ное физическое трехмерное пространство. Далее осуществляется подгонка полученной структуры к заранее выбранной модели с большим числом варьируемых параметров. Итак, многомерный подход в его современной формулировке подразумевает, что исследуемый материал уже синтезирован и результаты дифракционных исследований имеются в наличии. Если же стоит задача поиска гипотетических структур с требуемым квазикристаллическим дальним порядком и заданным локальным, то общепринятые методы структурного описания квазикристаллов едва ли применимы.

Авторами статьи была предложена теория строения икосаэдрических квазикристаллов на базе концепции элементарных ячеек [40–44]. В рамках такого подхода наблюдается полная аналогия со строением обычных периодических кристаллов. Разница лишь в том, что структура периодических кристаллов описывается трансляциями одной-единственной элементарной ячейки, а квазикристалл представляет собой упаковку сразу нескольких типов элементарных ячеек из определенного базового набора. Заполнение пространства ячейками осуществляется при помощи итерационного алгоритма инфляций и дефляций, а не посредством трансляций. Элементарные ячейки квазикристалла могут быть по-разному ориентированы в пространстве согласно лемме Бёрнсайда об орбите и стабилизаторе (иначе называемой также леммой Коши–Фробениуса). Элементарная ячейка кристалла заполняется конкретными атомами с учетом конкретной пространственной группы в соответствии с позициями Вайкоффа. Ячейки квазикристалла заполняются с учетом их собственной симметрии в соответствии с подгруппой-стабилизатором и правилами локального соответствия. Правила локального соответствия накладывают дополнительные требования, чтобы позиции атомов на гранях, ребрах и в вершинах различных элементарных ячеек были согласованы, если они соприкасаются друг с другом. Как и для кристаллов, можно перечислить строго определенное число позиций общего и частного положения. Все ячейки одного типа заполняются атомами одинаковым образом.

Таким образом, квазикристаллы можно рассматривать как упаковки идентичных копий ячеек

нескольких типов. Для каждой ячейки следует указать ее тип, а также ориентацию и положение в пространстве относительно центра упаковки.

Существует 3 основных типа икосаэдрических квазикристаллов: P , I , F [45]. Они получают посредством проецирования срезов шестимерных аналогов примитивной, объемно-центрированной и гранецентрированной кубических решеток. В основе упаковки P -типа лежит разбиение Соколар–Стейнхардта на золотые зоноэдры [46]. Правила подстановок для зоноэдров, алгоритм построения упаковки и получающиеся характерные структурные фрагменты детально описаны авторами в [40–42]. Построение упаковок I - и F -типов базируется на использовании двух различных разбиений на тетраэдры Данцера [47]. Алгоритм их построения подробно рассмотрен авторами в [43, 44].

Знание принципов построения квазикристаллической упаковки позволяет перейти к дизайну иерархических структур следующего уровня сложности. Например, это могут быть периодически чередующиеся аperiодические блоки либо, наоборот, фрагменты периодических кристаллов, объединенные по правилам, характерным для детерминированных аperiодических структур. Иными словами, аperiодический порядок можно использовать для инжиниринга сверхрешеток и наноструктур нового типа – на основе квазикристаллических блоков (в более широком смысле – на основе аperiодического порядка).

В настоящее время ведутся активные исследования, направленные на разработку оптических фильтров на основе многослойных аperiодических структур (при этом широко используются последовательности Фибоначчи, Тью–Морзе, Рудина–Шапиро), концентраторов для сверхтонких фотовольтаических элементов на основе спирально расположенных массивов точек, а также аperiодических структур на основе распределения нетривиальных нулей дзета-функции Римана [25]. Последние, в частности, могут найти применение в квантовых вычислениях и инженерии Флоке [48]. Авторами статьи был создан прототип аperiодической дифракционной решетки, основанной на связи между простыми числами и нулями дзета-функции Римана, и впервые продемонстрирован дифракционный спектр, индексируемый простыми числами [49].

При разработке аperiодических наноструктур с элементами наноархитектоники важным требованием является объединение субъединиц и строительных блоков в сложную иерархическую наноструктуру таким образом, чтобы локальный порядок при переходе через интерфейсные области менялся незначительно. При дизайне относительно простых многослойных структур обычно подразумевается, что между отдельными слоями существует эпитаксиальное соответствие. Сложные иерархические структуры строятся на принципах модульного дизайна [50]. Он хорошо зарекомендовал себя при анализе строения сложных многокомпонентных химических соединений с большим числом атомов в элементарной ячейке, а также при анализе кластеров [51]. Заметим, что ранее принципы модульного дизайна к квазикристаллическим структурам не применялись.

Перед авторами стояла задача применить общие принципы модульного дизайна к иерархическим структурам нового класса, содержащим квазикристаллические блоки. В результате оказалось, что чередующиеся слои с симметрией второго, третьего и пятого порядков можно объединить в единую иерархическую слоистую наноструктуру без существенного нарушения локального порядка при переходе через интерфейсные области. В рамках классической кристаллографии такая "сшивка" представляется невозможной. Такие интерфейсные области представляют собой когерентные гетерограницы нового типа.

Ранее авторами статьи было показано, что структуру икосаэдрического квазикристалла любого типа можно свести к упаковке зоноэдров [42]. При этом слои, вырезанные из икосаэдрических упаковок перпендикулярно осям 2-го, 3-го и 5-го порядков, будут содержать одинаковые цепочки триаконтаэдров с чередующимися короткими и длинными расстояниями между ними (как в LS -последовательности Фибоначчи) [41]. Если в упаковке зоноэдров триаконтаэдры отождествить с некими (мета-) атомами, то получится идеализированная структура гипотетического однокомпонентного икосаэдрического квазикристалла P -типа. Наличие идентичных структурных фрагментов в слоях с различной симметрией открывает возможности для применения модульного дизайна.

Использованный авторами теоретический подход основывается на предварительном построении трехмерной икосаэдрической упаковки с последующим вырезанием из нее чередующихся двумерных фрагментов различной симметрии, пересекающихся по общим цепочкам эквивалентных узлов.

Результаты. Поясним, каким образом в описанном методе обеспечивается бездефектная "сшивки" слоев. Вначале строились упаковки зоноэдров (икосаэдрические квазикристаллы *P*-типа) в соответствии с итерационным алгоритмом [42]. Полученные упаковки сохранялись в виде списков, содержавших сотни тысяч ячеек. Затем осуществлялась фильтрация списков по типу ячейки, так что в них оставляли только триаконтаэдры. Из интересующей упаковки вырезали слой, перпендикулярный оси 5-го порядка и проходящий через начало координат. В этом слое на некотором расстоянии от начала координат в ту и в другую сторону искали упомянутую выше цепочку эквивалентных узлов. В результате получалась полоса, внутри которой расположение узлов характеризуется симметрией 5-го порядка. Затем вырезали полосу из слоя, перпендикулярного оси 2-го порядка, но он проходил не через начало координат, а через найденную на предыдущем шаге общую цепочку эквивалентных узлов. Далее процесс повторялся, так что в итоге получалась иерархическая наноструктура из чередующихся полос с симметрией 5-го и 2-го порядков, сшитых воедино без существенного нарушения локального порядка при переходе через интерфейсные области. Аналогичным образом получали наноструктуру из чередующихся полос с симметрией 5-го и 3-го порядков. В целом этот метод можно представить как проецирование единой трехмерной структуры на изломанную двумерную поверхность.

Результаты представлены на рисунке. На рисунке *a* демонстрируется возможность чередования полос (слоев) с симметрией 5-го и 2-го порядков, а на рисунке *б* – с симметрией 5-го и 3-го порядков соответственно.

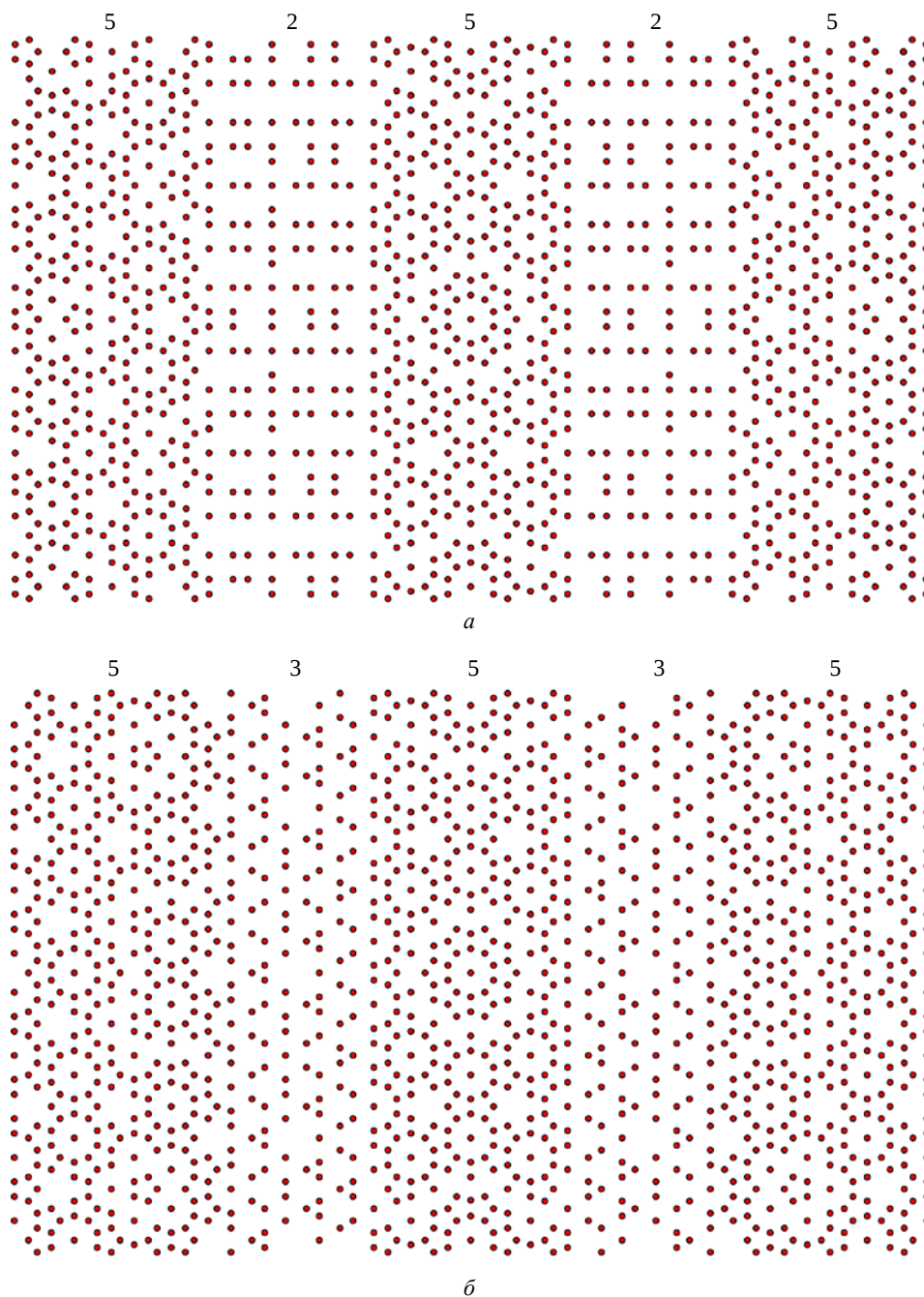
Еще раз обратим внимание на то, что полосы с локальной симметрией 2, 3 и 5-го порядков соответствуют фрагментам гипотетического однокомпонентного квазикристалла. Воз-

можная структура (возможные структуры) однокомпонентного икосаэдрического квазикристалла и условия его термодинамической стабильности в целом на сегодняшний день являются нерешенными проблемами [38]. Авторам известна только одна работа, в которой представлены результаты вычислительного эксперимента по исследованию процесса самосборки однокомпонентного квазикристалла методами молекулярной динамики [52]. Образование икосаэдрической структуры возможно в случае осциллирующего парного потенциала взаимодействия с несколькими локальными минимумами. Для определенных значений параметров взаимодействия икосаэдрический ближний и дальний порядки формировались быстро и с высокой степенью воспроизводимости. Полученные авторами статьи характерные структурные мотивы для взаимного расположения атомов внутри фрагментов с различной симметрией в целом качественно согласуются с результатами работы [52].

На практике объединение нескольких различных квазикристаллических фрагментов в единую иерархическую структуру предоставляет широкие возможности для управления коэффициентом преломления и коэффициентом отражения. По мнению авторов, подобные структуры могут также найти свое применение либо при дизайне многослойных апериодических структур (в том числе, упаковок слоев из апериодически расположенных стержней), либо при создании искусственных двумерных квазикристаллических разбиений методами сканирующей зондовой микроскопии для целей наноплазмоники [53].

Заключение. Представлен критический обзор наиболее перспективных применений квазикристаллов в электротехническом материаловедении и вытекающих из этого фундаментальных задач. Квазикристаллический дальний порядок может быть реализован как на атомарном уровне, так и в структурах из неатомарных строительных блоков.

Показана возможность использования принципов модульного дизайна при инжиниринге сложных иерархических наноструктур, содержащих квазикристаллические блоки. Представлены примеры "сшивки" чередующихся слоев с симметрией 2, 3 и 5-го порядков в единую иерархическую наноструктуру без нарушения локального порядка при переходе через интер-



Наноструктуры с когерентными интерфейсами: *a* – "сшивка" фрагментов с симметрией 5-го и 2-го порядков;
b – "сшивка" фрагментов с симметрией 5-го и 3-го порядков

Nanostructures with coherent interfaces: *a* – cross-linking of 5-fold and 2-fold fragments;
b – cross-linking of 5-fold and 3-fold fragments

фейсные области. Эти результаты открывают новые возможности при разработке многослойных наноструктур нового типа, а также предо-

ставляют перспективные варианты новых топологических решений при создании искусственных двумерных квазикристаллических структур.

Авторский вклад

Мадисон Алексей Евгеньевич – руководство исследованием; теоретическая разработка научной концепции, анализ литературы; анализ результатов; написание статьи.

Мадисон Павел Алексеевич – анализ литературы; теоретическая разработка метода; программная реализация алгоритмов; анализ результатов; участие в подготовке финальной версии статьи.

Мошников Вячеслав Алексеевич – вклад в разработку и проведение исследования; анализ результатов; участие в подготовке финальной версии статьи.

Соломонов Александр Васильевич – анализ результатов; участие в подготовке финальной версии статьи.

Author's contribution

Alexey E. Madison, supervising scientific research; theoretical conceptualization; literature review; analysis of the results; writing the manuscript.

Pavel A. Madison, literature review; development and implementation of the method; analysis of the results; contribution to the final manuscript.

Vyacheslav A. Moshnikov, contribution to the design and implementation of the research; analysis of results; contribution to the final manuscript.

Alexander V. Solomonov, analysis of the results; contribution to the final manuscript.

Список литературы

1. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry / D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J. W. Cahn // *Phys. Rev. Lett.* 1984. Vol. 53, № 20. P. 1951–1953.
doi: 10.1103/PhysRevLett.53.1951
2. Дайсон Ф. Птицы и лягушки в математике и физике // *Успехи физических наук.* 2010. Т. 180, № 8. С. 859–870.
doi: 10.3367/UFNr.0180.201008f.0859
3. Dubois J. M. Properties- and Applications of Quasicrystals and Complex Metallic Alloys // *Chemical Society Reviews.* 2012. Vol. 41, iss. 20. P. 6760–6777.
doi: 10.1039/C2CS35110B
4. Maciá E. Optimizing the thermoelectric efficiency of icosahedral quasicrystals and related complex alloys // *Phys. Rev. B.* 2009. Vol. 80, № 20. Art. № 205103.
doi: 10.1103/PhysRevB.80.205103
5. Stadnik Z. M. Magnetic properties of quasicrystals and their approximants // *Handbook of Magnetic Materials.* 2013. Vol. 21. P. 77–130.
doi: 10.1016/B978-0-444-59593-5.00002-7
6. Complex metallic alloys as new materials for additive manufacturing / S. Kenzari, D. Bonina, J. M. Dubois, V. Fournée // *Science and Technology of Advanced Materials.* 2014. Vol. 15, № 2. Art. № 024802.
doi: 10.1088/1468-6996/15/2/024802
7. Discovery of superconductivity in quasicrystal / K. Kamiya, T. Takeuchi, N. Kabeya, N. Wada, T. Ishimasa, A. Ochiai, K. Deguchi, K. Imura, N. K. Sato // *Nature Communications.* 2018. Vol. 9, № 1. Art. № 154.
doi: 10.1038/s41467-017-02667-x
8. Швейкин Г. П., Ивановский А. Л. Химическая связь и электронные свойства боридов металлов // *Успехи химии.* 1994. Т. 63, № 9. С. 751–775.
doi: 10.1070/RC1994v063n09ABEH000114
9. Possibility of semiconducting quasicrystal in boron-rich solids / K. Kimura, A. Hori, M. Takeda, H. Yamashita, H. Ino // *J. of Non-Crystalline Solids.* 1993. Vol. 153–154. P. 398–402.
doi: 10.1016/0022-3093(93)90382-8
10. Search for the boron quasicrystal by first-principle-calculation / T. Takahashi, K. Kitahara, Y. Katsura, J. Okada, Y. Matsushita, K. Kimura // *Solid State Sciences.* 2020. Vol. 108. Art. № 106377.
doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2020.106377
11. Haberl B., Strobel T. A., Bradby J. E. Pathways to exotic metastable silicon allotropes // *Appl. Phys. Rev.* 2016. Vol. 3. Art. № 040808.
doi: 10.1063/1.4962984
12. Dmitrienko V. E., Kléman M. Icosahedral order and disorder in semiconductors // *Philosophical Magazine Lett.* 1999. Vol. 79, № 6. P. 359–367.
doi: 10.1080/095008399177200
13. Oganov A. R., Glass C. W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications // *J. Chemical Physics.* 2006. Vol. 124, iss. 24. Art. № 244704.
doi: 10.1063/1.2210932
14. Wagner J., Núñez-Valdez M. Ab initio study of band gap properties in metastable BC8/ST12 Si_xGe_{1-x} alloys // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 117. Art. № 032105.
doi: 10.1063/5.0010311
15. First-principles structural design of superhard materials / X. Zhang, Y. Wang, J. Lv, C. Zhu, Q. Li, M. Zhang, Q. Li, Y. Ma // *J. of Chemical Physics.* 2013. Vol. 138, № 11. Art. № 114101.
doi: 10.1063/1.4794424
16. Шевченко В. Я., Мадисон А. Е. Икосаэдрический алмаз // *Физика и химия стекла.* 2006. Т. 32, № 1. С. 161–165.
17. Shevchenko V. Ya., Madison A. E., Mackay A. L. Coherent coexistence of nanodiamonds and carbon onions in icosahedral core-shell particles // *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances.* 2007. Vol. 63, № 2. P. 172–176.
doi: 10.1107/S0108767307002723
18. Growth mechanism of icosahedral and other five-fold symmetric diamond crystals / Q. P. Wei, L. Ma, J. Ye, Z. M. Yu // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2015. Vol. 25, № 5. P. 1587–1598.
doi: 10.1016/S1003-6326(15)63762-1
19. Complex nanostructures in diamond / P. Németh, K. McColl, L. A. J. Garvie, C. G. Salzmann, M. Murri, P. F. McMillan // *Nature Materials.* 2020. Vol. 19. P. 1126–1131.
doi: 10.1038/s41563-020-0759-8
20. Krajčí M., Hafner J. Topologically induced semiconductivity in icosahedral Al–Pd–Re and its approximants // *Phys Rev. B.* 2007. Vol. 75. Art. № 024116.
doi: 10.1103/PhysRevB.75.024116

21. Takagiwa Y., Kimura K. Metallic-covalent bonding conversion and thermoelectric properties of Al-based icosahedral quasicrystals and approximants // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2014. Vol. 15. Art. № 044802.
doi: 10.1088/1468-6996/15/4/044802
22. Крёмер Г. Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам // *Успехи физических наук*. 2002. Т. 172, № 9. С. 1087–1101.
doi: 10.3367/UFNr.0172.200209f.1087
23. Quasicrystalline materials from non-atom building blocks / Y. Nagaoka, J. Schneider, H. Zhu, O. Chen // *Matter*. 2023. Vol. 6. P. 30–58.
doi: 10.1016/j.matt.2022.09.027
24. High-throughput screening of 3D-printed architected materials inspired by crystal lattices: procedure, challenges, and mechanical properties / M. Yu. Arsentev, E. I. Sysoev, A. I. Makogon, S. V. Balabanov, M. M. Sychev, M. H. Hammouri, V. A. Moshnikov // *ACS Omega*. 2023. Vol. 8, № 28. P. 24865–24874.
doi: 10.1021/acsomega.3c00874
25. Optics of Aperiodic Structures: Fundamentals and Device Applications / ed. by L. Dal Negro. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2014. 530 p.
doi: 10.1201/b15653
26. Vardeny Z., Nahata A., Agrawal A. Optics of Photonic Quasicrystals // *Nature Photonics*. 2013. Vol. 7, № 3. P. 177–187.
doi: 10.1038/nphoton.2012.343
27. Experimental measurement of the photonic properties of icosahedral quasicrystals / W. Man, M. Megens, P. J. Steinhardt, P. M. Chaikin // *Nature*. 2005. Vol. 436. P. 993–996.
doi: 10.1038/nature03977
28. Poddubny A. N., Ivchenko E. L. Photonic quasicrystalline and aperiodic structures // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2010. Vol. 42, № 7. P. 1871–1895.
doi: 10.1016/j.physe.2010.02.020
29. McGurn A. R. Introduction to Photonic and Phononic Crystals and Metamaterials. Cham: Springer, 2020. 193 p.
doi: 10.1007/978-3-031-02384-2
30. Arjunan A., Baroutaji A., Robinson J. Advances in Acoustic Metamaterials / ed. by A. G. Olabi // *Encyclopedia of Smart Materials*. Elsevier, 2022. Vol. 3. P. 1–10.
doi: 10.1016/B978-0-12-815732-9.00091-7
31. Negative refraction and imaging with quasicrystals / X. Zhang, Z. Feng, Y. Wang, Z. Y. Li, B. Cheng, D. Z. Zhang; ed. C. M. Krowne, Y. Zhang // *Physics of Negative Refraction and Negative Index Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 167–182.
doi: 10.1007/978-3-540-72132-1_7
32. Boriskina S. Quasicrystals: Making invisible materials // *Nature Photonics*. 2015. Vol. 9. P. 422–424.
doi: 10.1038/nphoton.2015.107
33. Jeon S. Y., Kwon H., Hur K. Intrinsic photonic wave localization in a three-dimensional icosahedral quasicrystal // *Nature Physics*. 2017. Vol. 13. P. 363–368.
doi: 10.1038/nphys4002
34. Experimental observation of intrinsic light localization in photonic icosahedral quasicrystals / A. D. Sinelnik, I. I. Shishkin, X. Yu, K. B. Samusev, P. A. Belov, M. F. Limonov, P. Ginzburg, M. V. Rybin // *Advanced Optical Materials*. 2020. Vol. 8, iss. 21. Art. № 2001170.
doi: 10.1002/adom.202001170
35. Observation of localization of light in linear photonic quasicrystals with diverse rotational symmetries / P. Wang, Q. Fu, V. V. Konotop, Y. V. Kartashov, F. Ye // *Nature Photonics*. 2024. Vol. 18. P. 224–229.
doi: 10.1038/s41566-023-01350-6
36. Florescu M., Torquato S., Steinhardt P. J. Complete band gaps in two-dimensional photonic quasicrystals // *Phys. Rev. B*. 2009. Vol. 80. Art. № 155112.
doi: 10.1103/PhysRevB.80.155112
37. Widom M., Mihalkovič M. Quasicrystal structure prediction: A review // *Israel J. of Chemistry*. 2024. Vol. 64, № 10–12. Art. № e202300122.
doi: 10.1002/ijch.202300122
38. Steurer W. Quasicrystals: What do we know? What do we want to know? What can we know? // *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances*. 2018. Vol. 74. P. 1–11.
doi: 10.1107/S2053273317016540
39. Steurer W., Deloudi S. Crystallography of Quasicrystals. Concepts, Methods and Structures. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. 384 p.
doi: 10.1007/978-3-642-01899-2
40. Madison A. E. Substitution rules for icosahedral quasicrystals // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5, iss. 8. P. 5745–5753.
doi: 10.1039/C4RA09524C
41. Madison A. E. Atomic structure of icosahedral quasicrystals: stacking multiple quasi-unit cells // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5, iss. 97. P. 79279–79297.
doi: 10.1039/C5RA13874D
42. Мадисон А. Е., Мадисон П. А., Мошников В. А. Концепция элементарных ячеек в теории квазикристаллов // *Журн. техн. физики*. 2024. Т. 94, № 4. С. 561–574.
43. Мадисон А. Е., Мадисон П. А. Теория строения икосаэдрических квазикристаллов: общие принципы // *Журн. техн. физики*. 2024. Т. 94, № 12. С. 2123–2134.
44. Мадисон А. Е., Мадисон П. А. Теория строения икосаэдрических квазикристаллов: типы упаковок // *Журн. техн. физики*. 2025. Т. 95, № 1. С. 56–78.
45. Levitov L. S., Rhyner J. Crystallography of quasicrystals; application to icosahedral symmetry // *J. Phys. France*. 1988. Vol. 49. P. 1835–1849.
doi: 10.1051/jphys:0198800490110183500
46. Socolar J. E. S., Steinhardt P. J. Quasicrystals. II. Unit-cell configurations // *Phys. Rev. B*. 1986. Vol. 34, № 2. P. 617–647.
doi: 10.1103/PhysRevB.34.617
47. Danzer L. Three-dimensional analogs of the planar Penrose tilings and quasicrystals // *Discrete Mathematics*. 1989. Vol. 76, № 1. P. 1–7.
doi: 10.1016/0012-365X(89)90282-3
48. Identifying the Riemann zeros by periodically driving a single qubit / R. He, M. Z. Ai, J. M. Cui,

Y. F. Huang, Y. J. Han, C. F. Li, T. Tu, C. E. Creffield, G. Sierra, G. C. Guo // Phys. Rev. A. 2020. Vol. 101, № 4. Art. № 043402.

doi: 10.1103/PhysRevA.101.043402

49. Аперидическая дифракционная решетка, основанная на связи между простыми числами и нулями дзета-функции Римана / А. Е. Мадисон, Д. А. Козодаев, А. Н. Казанков, П. А. Мадисон, В. А. Мошников // Журн. техн. физики. 2024. Т. 94, № 4. С. 658–663.

50. Crystallography of Modular Materials / G. Ferraris, E. Makovicky, S. Merlino. Oxford: Oxford University Press, 2008. 372 p.

doi: 10.1093/acprof:oso/9780199545698.001.0001

51. Бульенков Н. А., Тытик Д. Л. Модульный дизайн икосаэдрических металлических кластеров // Изв. Академии наук. Сер. химическая. 2001. № 1. С. 1–19.

52. Computational self-assembly of a one-component icosahedral quasicrystal / M. Engel, P. F. Damasceno, C. L. Phillips, S. C. Glotzer // Nature Materials. 2015. Vol. 14. P. 109–116.

doi: 10.1038/nmat4152

53. Fabricating quasiperiodic tilings with thermal-scanning probe lithography / L. Chandler, O. J. Barker, A. J. Wright, L. O'Brien, S. Coates, R. McGrath, R. Lifshitz, H. R. Sharma // Israel J. of Chemistry. 2024. Vol. 64, № 10–11. Art. № e202300115.

doi: 10.1002/ijch.202300115

Информация об авторах

Мадисон Алексей Евгеньевич – кандидат физико-математических наук (1994), доцент (2000), лауреат премии Международной академической издательской компании МАИК "Наука/Интерпериодика" за лучшую публикацию в издаваемых при ее участии журналах (2002), ведущий научный сотрудник Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики". Автор 51 научной работы. Сфера научных интересов – симметрия; квазикристаллы; аперидические структуры.

Адрес: Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", ул. Союза Печатников, д. 16, Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: alex_madison@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7592-2980>

Мадисон Павел Алексеевич – кандидат физико-математических наук (2024), ассистент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 17 научных работ. Сфера научных интересов – икосаэдрические квазикристаллы; аперидические структуры.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: palmadis@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0722-6646>

Мошников Вячеслав Алексеевич – доктор физико-математических наук (1997), профессор (1999), почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2007), профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 600 научных работ. Сфера научных интересов – методы микро- и нанодиагностики; коллоидные квантовые точки; золь-гель-технология; иерархические пористые материалы; биосенсоры; солнечные элементы; фотокатализаторы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vamooshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

Соломонов Александр Васильевич – доктор физико-математических наук (2000), профессор (2002), профессор кафедры микро- и наноэлектроники, заслуженный профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – микроэлектроника и оптика полупроводников; наноэлектроника; квантово-размерные гетероструктуры.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6721-4159>

References

1. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry. Phys. Rev. Lett. 1984, vol. 53, no. 20, pp. 1951–1953.
doi: 10.1103/PhysRevLett.53.1951

2. Dyson F. Birds and Frogs. Notices of the American Mathematical Society. 2009, vol. 56, no. 2, pp. 212–223.

3. Dubois J. M. Properties- and Applications of Quasicrystals and Complex Metallic Alloys. Chemical Society Reviews. 2012, vol. 41, iss. 20, pp. 6760–6777.

doi: 10.1039/C2CS35110B

4. Maciá E. Optimizing the Thermoelectric Efficiency of Icosahedral Quasicrystals and Related Complex Alloys. *Phys. Rev. B*. 2009, vol. 80, no. 20, art. no. 205103.

doi: 10.1103/PhysRevB.80.205103

5. Stadnik Z. M. Magnetic Properties of Quasicrystals and Their Approximants. *Handbook of Magnetic Materials*. 2013, vol. 21, pp. 77–130.

doi: 10.1016/B978-0-444-59593-5.00002-7

6. Kenzari S., Bonina D., Dubois J. M. Fournée V. Complex Metallic Alloys as New Materials for Additive Manufacturing. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2014, vol. 15, no. 2, art. no. 024802.

doi: 10.1088/1468-6996/15/2/024802

7. Kamiya K., Takeuchi T., Kabeya N., Wada N., Ishimasa T., Ochiai A., Deguchi K., Imura K., Sato N. K. Discovery of superconductivity in quasicrystal. *Nature Communications*. 2018, vol. 9, no. 1, art. no. 154.

doi: 10.1038/s41467-017-02667-x

8. Shveikin G. P., Ivanovskii A. L. The Chemical Bonding and Electronic Properties of Metal Borides. *Russ. Chem. Rev.* 1994, vol. 63, no. 9, pp. 711–734.

doi: 10.1070/RC1994v063n09ABEH000114

9. Kimura K., Hori A., Takeda M., Yamashita H., Ino H. Possibility of Semiconducting Quasicrystal in Boron-Rich Solids. *J. of Non-Crystalline Solids*. 1993, vol. 153–154, pp. 398–402.

doi: 10.1016/0022-3093(93)90382-8

10. Takahashi T., Kitahara K., Katsura Y., Okada J., Matsushita Y., Kimura K. Search for the Boron Quasicrystal by First-Principle-Calculation. *Solid State Sciences*. 2020, vol. 108, art. no. 106377.

doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2020.106377

11. Haberl B., Strobel T. A., Bradby J. E. Pathways to Exotic Metastable Silicon Allotropes. *Appl. Phys. Rev.* 2016, vol. 3, art. no. 040808.

doi: 10.1063/1.4962984

12. Dmitrienko V. E., Kléman M. Icosahedral Order and Disorder in Semiconductors. *Philosophical Magazine Let.* 1999, vol. 79, no. 6, pp. 359–367.

doi: 10.1080/095008399177200

13. Oganov A. R., Glass C. W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications. *J. Chemical Physics*. 2006, vol. 124, iss. 24, art. no. 244704.

doi: 10.1063/1.2210932

14. Wagner J., Núñez-Valdez M. Ab Initio Study of Band Gap Properties in Metastable BC₈/ST12 Si_xGe_{1-x} Alloys. *Appl. Phys. Let.* 2020, vol. 117, art. no. 032105.

doi: 10.1063/5.0010311

15. Zhang X., Wang Y., Lv J., Zhu C., Li Q., Zhang M., Li Q., Ma Y. First-principles structural design of superhard materials. *J. of Chemical Physics*. 2013, vol. 138, no. 11, art. no. 114101.

doi: 10.1063/1.4794424

16. Shevchenko V. Ya., Madison A. E. Icosahedral Diamond. *Glass Physics and Chemistry*. 2006, vol. 32, no. 1, pp. 118–121.

doi: 10.1134/S1087659606010160

17. Shevchenko V. Ya., Madison A. E., Mackay A. L. Coherent coexistence of nanodiamonds and carbon on-ions in icosahedral core-shell particles. *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances*. 2007, vol. 63, no. 2, pp. 172–176.

doi: 10.1107/S0108767307002723

18. Wei Q. P., Ma L., Ye J., Yu Z. M. Growth Mechanism of Icosahedral and Other Five-Fold Symmetric Diamond Crystals. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015, vol. 25, no. 5, pp. 1587–1598.

doi: 10.1016/S1003-6326(15)63762-1

19. Németh P., McColl K., Garvie L. A. J., Salzmann C. G., Murri M., McMillan P. F. Complex Nanostructures in Diamond. *Nature Materials*. 2020, vol. 19, pp. 1126–1131.

doi: 10.1038/s41563-020-0759-8

20. Krajčí M., Hafner J. Topologically Induced Semiconductivity in Icosahedral Al–Pd–Re and Its Approximants. *Phys. Rev. B*. 2007, vol. 75, art. no. 024116.

doi: 10.1103/PhysRevB.75.024116

21. Takagiwa Y., Kimura K. Metallic–Covalent Bonding Conversion and Thermoelectric Properties of Al-based Icosahedral Quasicrystals and Approximants. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2014, vol. 15, art. no. 044802.

doi: 10.1088/1468-6996/15/4/044802

22. Kroemer H. Quasielectric Fields and Band Offsets: Teaching Electrons New Tricks. *Reviews of Modern Physics*. 2001, vol. 73, no. 3, pp. 783–793.

doi: 10.1103/RevModPhys.73.783

23. Nagaoka Y., Schneider J., Zhu H., Chen O. Quasicrystalline Materials from Non-Atom Building Blocks. *Matter*. 2023, vol. 6, pp. 30–58.

doi: 10.1016/j.matt.2022.09.027

24. Arsentev M. Yu., Sysoev E. I., Makogon A. I., Balabanov S. V., Sychev M. M., Hammouri M. H., Moshnikov V. A. High-Throughput Screening of 3D-Printed Architected Materials Inspired by Crystal Lattices: Procedure, Challenges, and Mechanical Properties. *ACS Omega*. 2023, vol. 8, no. 28, pp. 24865–24874.

doi: 10.1021/acsomega.3c00874

25. Optics of Aperiodic Structures: Fundamentals and Device Applications; ed. L. Dal Negro. Singapore, Pan Stanford Publishing, 2014, 530 p.

doi:10.1201/b15653

26. Vardeny Z., Nahata A., Agrawal A. Optics of photonic quasicrystals. *Nature Photonics*. 2013, vol. 7, no. 3, pp. 177–187.

doi: 10.1038/nphoton.2012.343

27. Man W., Megens M., Steinhardt P. J., Chaikin P. M. Experimental Measurement of the Photonic Properties of Icosahedral Quasicrystals. *Nature*. 2005, vol. 436, pp. 993–996.

doi: 10.1038/nature03977

28. Poddubny A. N., Ivchenko E. L., Photonic Quasicrystalline and Aperiodic Structures. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2010, vol. 42, no. 7, pp. 1871–1895.

doi: 10.1016/j.physe.2010.02.020

29. McGurn A. R. Introduction to Photonic and Phononic Crystals and Metamaterials. Cham, Springer, 2020, 193 p. doi: 10.1007/978-3-031-02384-2
30. Arjunan A., Baroutaji A., Robinson J. Advances in Acoustic Metamaterials. In: Encyclopedia of Smart Materials; ed. by A. G. Olabi. Elsevier, 2022, pp. 1–10. doi: 10.1016/B978-0-12-815732-9.00091-7
31. Zhang X., Feng Z., Wang Y., Li Z. Y., Cheng B., Zhang D. Z. Negative Refraction and Imaging with Quasicrystals. In: Physics of Negative Refraction and Negative Index Materials; ed. C. M. Krowne, Y. Zhang. Berlin, Heidelberg, Springer, 2007, pp. 167–182. doi: 10.1007/978-3-540-72132-1_7
32. Boriskina S. Quasicrystals: Making Invisible Materials. Nature Photonics. 2015, vol. 9, pp. 422–424. doi: 10.1038/nphoton.2015.107
33. Jeon S. Y., Kwon H., Hur K. Intrinsic photonic wave localization in a three-dimensional icosahedral quasicrystal. Nature Physics. 2017, vol. 13, pp. 363–368. doi: 10.1038/nphys4002
34. Sinelnik A. D., Shishkin I. I., Yu X., Samusev K. B., Belov P. A., Limonov M. F., Ginzburg P., Rybin M. V. Experimental observation of intrinsic light localization in photonic icosahedral quasicrystals. Advanced Optical Materials. 2020, vol. 8, iss. 21, art. no. 2001170. doi: 10.1002/adom.202001170
35. Wang P., Fu Q., Konotop V. V., Kartashov Y. V., Ye F. Observation of localization of light in linear photonic quasicrystals with diverse rotational symmetries. Nature Photonics. 2024, vol. 18, pp. 224–229. doi: 10.1038/s41566-023-01350-6
36. Florescu M., Torquato S., Steinhardt P. J. Complete Band Gaps in Two-Dimensional Photonic Quasicrystals. Phys. Rev. B. 2009, vol. 80, art. no. 155112. doi: 10.1103/PhysRevB.80.155112
37. Widom M., Mihalkovič M. Quasicrystal Structure Prediction: A Review. Israel J. of Chemistry. 2024, vol. 64, no. 10–12, art. no. e202300122. doi: 10.1002/ijch.202300122
38. Steurer W. Quasicrystals: What Do We Know? What Do We Want to Know? What Can We Know? Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances. 2018, vol. 74, pp. 1–11. doi: 10.1107/S2053273317016540
39. Steurer W., Deloudi S. Crystallography of Quasicrystals. Concepts, Methods and Structures. Berlin, Heidelberg, Springer, 2009, 384 p. doi: 10.1007/978-3-642-01899-2
40. Madison A. E. Substitution Rules for Icosahedral Quasicrystals. RSC Advances. 2015, vol. 5, iss. 8, pp. 5745–5753. doi: 10.1039/C4RA09524C
41. Madison A. E. Atomic structure of icosahedral quasicrystals: stacking multiple quasi-unit cells. RSC Advances. 2015, vol. 5, iss. 97, pp. 79279–79297. doi: 10.1039/C5RA13874D
42. Madison A. E., Madison P. A., Moshnikov V. A. The Concept of Unit Cells in the Theory of Quasicrystals. Tech. Phys. 2024, vol. 69, no. 4, pp. 528–541.
43. Madison A. E., Madison P. A. Theory of the Structure of Icosahedral Quasicrystals: General Principles. Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki [Tech. Phys.]. 2024, vol. 69, no. 12, pp. 2123–2134. (In Russ.)
44. Madison A. E., Madison P. A. Theory of the Structure of Icosahedral Quasicrystals: Types of Packings. Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki [Tech. Phys.]. 2025, vol. 70, no. 1, pp. 56–78. (In Russ.)
45. Levitov L. S., Rhyner J. Crystallography of Quasicrystals; Application to Icosahedral Symmetry. J. Phys. France. 1988, vol. 49, pp. 1835–1849. doi: 10.1051/jphys:0198800490110183500
46. Socolar J. E. S., Steinhardt P. J. Quasicrystals. II. Unit-Cell Configurations. Phys. Rev. B. 1986, vol. 34, no. 2, pp. 617–647. doi: 10.1103/PhysRevB.34.617
47. Danzer L. Three-dimensional analogs of the planar Penrose tilings and quasicrystals. Discrete Mathematics. 1989, vol. 76, no. 1, pp. 1–7. doi: 10.1016/0012-365X(89)90282-3
48. He R., Ai M. Z., Cui J. M., Huang Y. F., Han Y. J., Li C. F., Tu T., Creffield C. E., Sierra G., Guo G. C. Identifying the Riemann Zeros by Periodically Driving a Single Qubit. Phys. Rev. A. 2020, vol. 101, no. 4, art. no. 043402. doi: 10.1103/PhysRevA.101.043402
49. Madison A. E., Kozodaev D. A., Kazankov A. N., Madison P. A., Moshnikov V. A. Aperiodic Diffraction Grating Based on the Relationship between Primes and Zeros of the Riemann Zeta Function. Tech. Phys. 2024, vol. 69, no. 4, pp. 620–624.
50. Ferraris G., Makovicky E., Merlino S. Crystallography of Modular Materials. Oxford, Oxford University Press, 2008, 372 p. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199545698.001.0001
51. Bulienkov N. A., Tytik D. L. Modular Design of Icosahedral Metal Clusters. Russ. Chem. Bull. 2001, vol. 50, no. 1, pp. 1–19. doi: 10.1023/A:1009524314066
52. Engel M., Damasceno P. F., Phillips C. L., Glotzer S. C. Computational Self-Assembly of a One-Component Icosahedral Quasicrystal. Nature Materials. 2015, vol. 14, pp. 109–116. doi: 10.1038/nmat4152
53. Chandler L., Barker O. J., Wright A. J., O'Brien L., Coates S., McGrath R., Lifshitz R., Sharma H. R. Fabricating Quasiperiodic Tilings with Thermal-Scanning Probe Lithography. Israel J. of Chemistry. 2024, vol. 64, no. 10–11, art. no. e202300115. doi: 10.1002/ijch.202300115

Information about the authors

Alexey E. Madison, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (1994), Associate Professor (2000), Winner of the Award of the International Academic Publishing Company MAIK "Nauka/Interperiodica" (Pleiades Publishing, Inc.) for the best scientific publication (2002), Leading Researcher of HSE University, Saint Petersburg. The author of 51 scientific publications. Area of expertise: symmetry; icosahedral quasicrystals; aperiodic structures.

Address: HSE University, 16, Soyuza Pechatnikov St., St Petersburg 190121, Russia

E-mail: alex_madison@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7592-2980>

Pavel A. Madison, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2024), Assistant Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 17 scientific publications. Area of expertise: icosahedral quasicrystals; aperiodic structures.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: palmadis@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0722-6646>

Vyacheslav A. Moshnikov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1997), Professor (1999), Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2007), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 600 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanodiagnostic methods; colloidal quantum dots; sol-gel technology; hierarchical porous materials; bio-sensors; solar cells; photocatalysts.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vamosnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

Alexander V. Solomonov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2000), Professor (2002), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Distinguished Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: microelectronics and optics of semiconductors; nanoelectronics; quantum-sized heterostructures.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6721-4159>

Формирование в вакууме композиционного слоя с островковыми наноструктурами

С. В. Сидорова^{1✉}, И. Е. Пименов², А. Д. Купцов¹, А. А. Фельде¹

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

²Федеральное государственное унитарное предприятие "НАМИ", Москва, Россия

✉ sidorova@bmstu.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время тенденции развития электроники требуют от устройств увеличения производительности, повышения эффективности, миниатюризации, снижения себестоимости. Внедрение наноразмерных, в том числе и островковых, структур и слоев на их основе может стать перспективой развития многих отраслей электроники. Островковыми тонкими пленками и наноструктурами (ОНС) называются тонкопленочные структуры, формирование которых завершили на начальных стадиях. Размеры островков не превышают 100 нм в латеральном и вертикальном направлениях, благодаря чему в массивах ОНС проявляются размерные эффекты (электрические, магнитные, оптические, механические и т. д.). Интерес представляет формирование композиционного слоя диэлектрика и внедренных в него проводящих ОНС.

Цель работы. Разработка способа и отработка режимов формирования композиционного покрытия с ОНС.

Материалы и методы. Исследования проводятся на кафедре электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н. Э. Баумана. Материалы исследования – оксид алюминия и медь. Технологическое оборудование – вакуумная установка МВТУ-11-1МС, оснащенная магнетронным и ионным источниками. Исследования шероховатости поверхностей подложки и покрытий проводится на атомно-силовом микроскопе Solver NEXT; геометрических параметров композиционного слоя – на сканирующем электронном микроскопе Crossbeam 550.

Результаты. Средние абсолютные значения скорости осаждения для меди и оксида алюминия – 25.9 и 0.3 нм/мин соответственно. Для формирования композиционной структуры с ОНС диаметром 100 нм и расстоянием между островками 3...5 нм проводящая вставка имеет размеры: диаметр 25 мм, ширина 0.46 мм. Для получения однородной структуры и качественного сцепления композиционного слоя с подложкой требуется предварительная ионная обработка подложки в течение 120 с.

Заключение. Разработанный способ формирования композиционного покрытия с островковыми наноструктурами предполагает использование комбинированной мишени. Практическое применение результатов работы: возможность формирования методом магнетронного распыления в вакууме композиционных тонкопленочных покрытий из диэлектрика и проводящих наноразмерных структур.

Ключевые слова: островковые тонкие пленки, магнетронное распыление, комбинированная мишень, вакуум, шероховатость, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия

Для цитирования: Формирование в вакууме композиционного слоя с островковыми наноструктурами / С. В. Сидорова, И. Е. Пименов, А. Д. Купцов, А. А. Фельде // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 94–106.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-94-106

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.07.2024; принята к публикации после рецензирования 25.11.2024; опубликована онлайн 30.04.2025

Composite Layer Formation with Island Nanostructures in Vacuum

Svetlana V. Sidorova^{1✉}, Ilya E. Pimenov², Alexey D. Kouptsov¹, Anastasiya A. Felde¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Federal State Unitary Enterprise "NAMI", Moscow, Russia

✉ sidorova@bmstu.ru

Abstract

Introduction. The current trends in the development of electronics require miniaturized devices with increased performance at affordable costs. The introduction of nanoscale structures and layers based thereon, including island structures, offers great opportunities for the development of various branches of electronics. Island thin films and nanostructures (INS) are thin-film structures whose formation has been completed at the initial stages. The size of the islands does not exceed 100 nm in the lateral and vertical directions, which makes the INS arrays to exhibit dimensional effects (electrical, magnetic, optical, mechanical, etc.). The formation of a composite dielectric layer with embedded conductive INS presents particular interest.

Aim. Development of a technique and testing of formation modes of a composite coating with INS.

Materials and methods. The research was carried out at the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The research materials alumina and copper. A MVTU-11-1MC vacuum unit, equipped with magnetron and ion sources, was used as technological equipment. The roughness of the substrate and coating surfaces was studied using a Solver NEXT atomic force microscope; the geometric parameters of the composite layer were studied using a CROSSBEAM 550 scanning electron microscope.

Results. The average absolute deposition rates for copper and alumina were 25.9 and 0.3 nm/min, respectively. A conductive insert with a diameter of 25 mm and a width of 0.46 mm was used to form a composite structure with a diameter of 100 nm and a distance between the islands of 3...5 nm. To obtain a homogeneous structure and a high-quality adhesion of the composite layer to the substrate, preliminary ion treatment of the substrate for 120 s was required.

Conclusion. The developed method for forming a composite coating with INS involves the use of a combined target. The results obtained can be used when creating composite thin-film coatings from dielectric and conductive nanoscale structures by magnetron sputtering in vacuum.

Keywords: island thin films, magnetron sputtering, combined target, vacuum, roughness, atomic force microscopy, scanning electron microscopy

For citation: Sidorova S. V., Pimenov I. E., Kouptsov A. D., Felde A. A. Composite Layer Formation with Island Nanostructures in Vacuum. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 94–106.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-94-106

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 06.07.2024; accepted 25.11.2024; published online 30.04.2025

Введение. Островковые наноструктуры (ОНС) находят применение в различных областях науки и техники от медицины и биологии до отраслей электроники, оптики и фотоники. Исследованием характеристик и свойств островковых наноструктур и их массивов занимаются ученые и исследователи как в России, так и за рубежом, начиная с 80-х гг. прошлого столетия. Однако в последние 15–20 лет актуальность разработки способов формирования ОНС и тонкопленочных покрытий возрастает год от года (рис. 1). Это связано с размерными эффектами в наноразмерных

структурах, которые наряду с миниатюризацией проявляются в нанометровом масштабе.

Быстрорастущая область промышленности – микроэлектроника требует от устройств помимо миниатюризации также увеличения производительности и эффективности, снижения себестоимости и нового функционала. Разработка новых технологических и конструктивных решений и их внедрение в устройства областей электроники в настоящее время приобретают большой интерес со стороны разработчиков и исследователей. Примером новых технологиче-

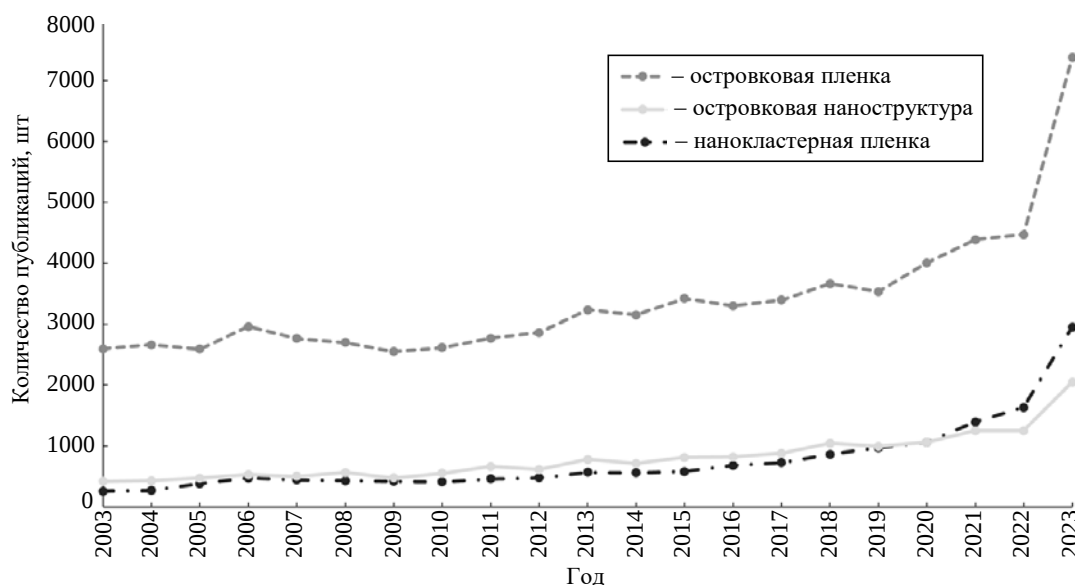


Рис. 1. Интерес научного сообщества к тематике "островковых тонких пленок и наноструктур" в период с 2003 по 2023 гг. по данным сайта sciencedirect.com

Fig. 1. Research interest in the topic of island thin films and nanostructures during 2003–2023 assessed according to the sciencedirect.com data

ских решений могут быть островковые наноструктуры [1], в том числе реализованные в композиционных слоях.

За счет внедрения многослойной островковой пленки ферромагнетиков и островковой тонкой пленки олова, серебра, алюминия можно достичь повышения чувствительности для датчиков слабых магнитных полей и газовых сенсоров соответственно [2]. Внедрение островкового слоя в конденсаторы позволяет увеличить их емкость в 2–20 раз. Такие конденсаторы находят свое применение в СВЧ-трактах, больших аккумуляторных батареях для транспорта и промышленных систем энергообеспечения [3–5].

Выбор метода получения островковых структур связан как с материалом формирования, так и с требованиями к функциональным и геометрическим параметрам островкового слоя [6]. При сравнении дорогостоящих и, безусловно, высокопроизводительных методов литографии с более доступными методами вакуумного нанесения покрытий выбор для формирования островкового слоя сделан в пользу методов вакуумного нанесения. Однако требуется тщательная отработка режимов формирования островкового слоя и поиск новых способов реализации процесса нанесения. Формирование в вакууме как однослойных островковых структур, так и комплекса многослойных островковых по-

крытий, чередующихся тонкопленочными слоями диэлектрика, является актуальной задачей.

Целью исследования являлась разработка способа и отработка режимов формирования композиционного покрытия с островковыми наноструктурами.

Материалы, методы и методика исследований. Исследования проводились на кафедре электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н. Э. Баумана. В качестве технологического оборудования применялась вакуумная установка МВТУ-11-1МС [7]. Предварительная подготовка подложек осуществлялась при помощи кольцевого источника ионов в едином вакуумном цикле с нанесением функциональных слоев. Очистка кремниевой подложки проводилась ионизированным потоком аргона. Известно о положительном влиянии ионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности [8, 9], а также на качество последующего сцепления тонкопленочных покрытий с обработанной ионным источником подложкой [10, 11]. Для отработки режимов формирования тонкопленочных слоев Cu и Al_2O_3 проводилось осаждение магнетронным распылением. Мишени магнетронного источника имели заданный стехиометрический состав Cu и Al_2O_3 .

Для формирования композиционного покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$ предложен метод магнетронного распыления в вакууме из комбинированной ми-

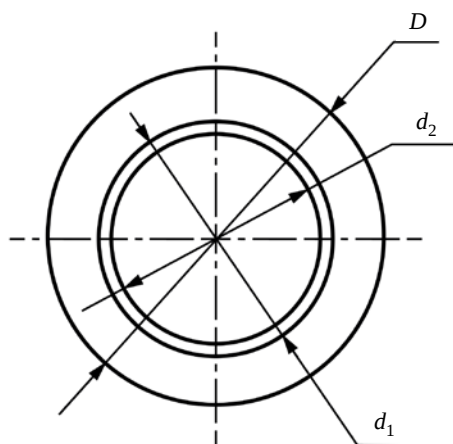


Рис. 2. Комбинированная мишень с кольцевой вставкой

Fig. 2. Combined target with annular insert

шени. Такая мишень представляет собой каркас из Al_2O_3 и вставки из Cu. Для разработки была предложена вставка в форме кольца (рис. 2) с учетом заданного диаметра мишени D и расчетных параметров геометрии мишени d_1 , d_2 .

Использование комбинированной мишени позволяет одновременно формировать островковое покрытие из Cu и заполнять пространство между проводящими островками материалом диэлектрика – Al_2O_3 . Также материал диэлектрика служит барьером для отдельных островков, так как срастание островков приводит к образованию лабиринтных пленок.

Методика формирования композиционного островкового покрытия включает в себя несколько этапов. Первым этапом является предварительная жидкостная очистка подложек в растворах щелочи, спирта и в деионизированной воде в ультразвуковой ванне. После очистки подложки устанавливаются в рабочую камеру и проводится откачка камеры до рабочего давления. Перед формированием покрытия подложки обрабатываются ионным источником. Проводится тренировка мишени и последующее формирование островковых тонких пленок методом магнетронного распыления из комбинированной мишени. После окончания процесса нанесения осуществляется остановка откачной системы, развакумирование и изъятие образцов для тестирования.

Формирование композиционного слоя с наноразмерными островковыми структурами по предложенной методике предполагает проведение предварительных исследований морфологии подложки и адгезии к ней наносимого материала.

Шероховатость подложки может влиять на формируемые островковые структуры, так как соизмерима с размерами островков.

Для оценки качества поверхности тонкопленочных покрытий используется атомно-силовой микроскоп (АСМ) Solver NEXT, с помощью которого измеряется шероховатость поверхностей. Оценка адгезионных свойств проверяется с помощью ручного скрайбера, который дефрагментирует слой пленки на отдельные зоны для отслоения. Степень адгезии покрытия к подложке оценивается качественным методом, при котором пленка разделяется скрайбером на фрагменты размером 1×1 мм. На пленку наклеивается липкая лента, которая отрывается под углом 90° к подложке. Оценивается степень отслоения пленки от подложки. Геометрические параметры сформированных структур оцениваются с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) ZEISS Crossbeam 550.

Результаты исследования морфологии подложки и покрытий. Для оценки влияния ионной обработки на шероховатость поверхностей подложки и покрытий на основании предыдущих исследований определено время – 120 и 600 с [12]. Проведены измерения шероховатости поверхности подложки без воздействия ионного пучка. Покрытие Al_2O_3 толщиной 150 нм наносится на все поверхности – без и после ионной обработки. На рис. 3 представлены АСМ-изображения подложки, тонкопленочных покрытий Al_2O_3 с разным временем предварительной обработки подложки.

На рис. 3 наблюдаются пики, исходящие из поверхности подложки или пленки. Высота пиков не превышает 3...5 нм. Количество и плотность расположения этих пиков варьируются в зависимости от времени предварительной ионной обработки, что может быть связано с характером роста пленки на поверхности подложки разной топологии. Следует отметить более равномерное распределение пиков на поверхности покрытия с предварительной ионной обработкой подложки.

На основании полученных после АСМ-исследования данных определены тренды изменения шероховатости подложки и покрытия после применения предварительной ионной

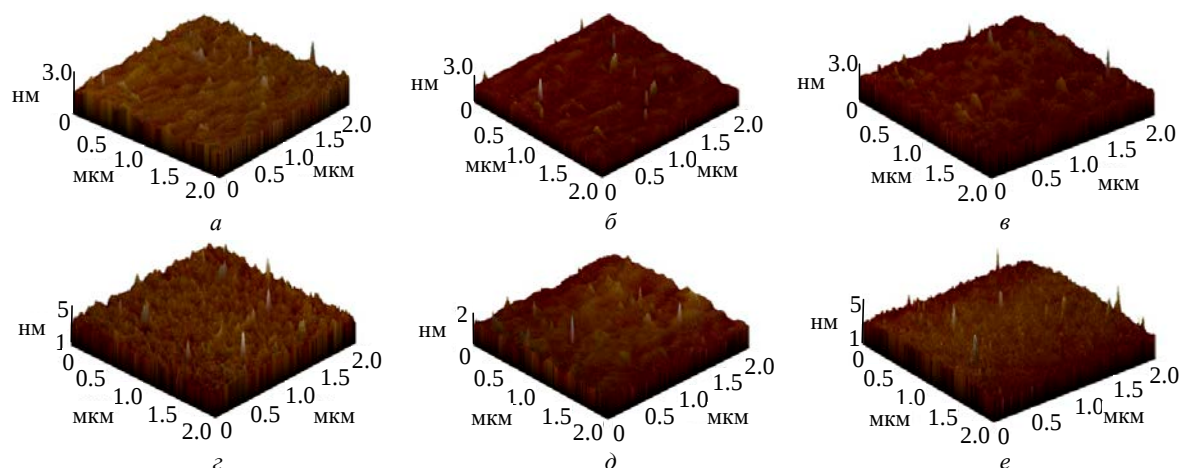


Рис. 3. АСМ-изображения поверхностей подложки до нанесения пленки при временах обработки 0, 120 и 600 с (а, б, в); пленки Al_2O_3 толщиной 150 нм при обработке 0, 120 и 600 с (г, д, е)

Fig. 3. AFM images of substrate surfaces before application at processing intervals of 0, 120 and 600 s (a, b, e); 150 nm thick Al_2O_3 films at processing intervals of 0, 120 and 600 s (g, d, e)

обработки. На рис. 4 представлены зависимости шероховатости поверхности подложки и пленки Al_2O_3 от времени ионной обработки.

После осаждения покрытия оксида алюминия средняя шероховатость для всех времен предварительной ионной обработки поверхности превысила 2.0 нм, что несколько выше исходной шероховатости кремниевой подложки (1.8 нм). С увеличением времени предварительной ионной обработки наблюдается меньший разброс по величине шероховатости для подложки. Однако для покрытия оксида алюминия меньший разброс по шероховатости показан для предварительной ионной обработки при 120 с. Именно такое время предварительной ионной обработки выбирается для дальнейших исследований.

Оценка шероховатости пленки меди проводится для толщин 50 и 100 нм, так как необходимо соблюсти наноразмерные масштабы тонкопленочного композиционного слоя. Подложка монокристаллического кремния перед осаждением обрабатывается в течение 120 с. Приводятся результаты экспериментов шероховатости поверхности без обработки и с обработкой (рис. 5).

Во всех АСМ-изображениях есть небольшие пики с круглой вершиной. На подложке без предварительной ионной обработки диаметр включений составляет от 50 до 80 нм при высоте от 1.5 до 2.5 нм. Для пленки меди, сформированной на подложке с предварительной ионной обработкой, диаметр пиков имеет меньший разброс – от 70 до 80 нм при высоте пиков в пределах 1 нм. Плотность и количество

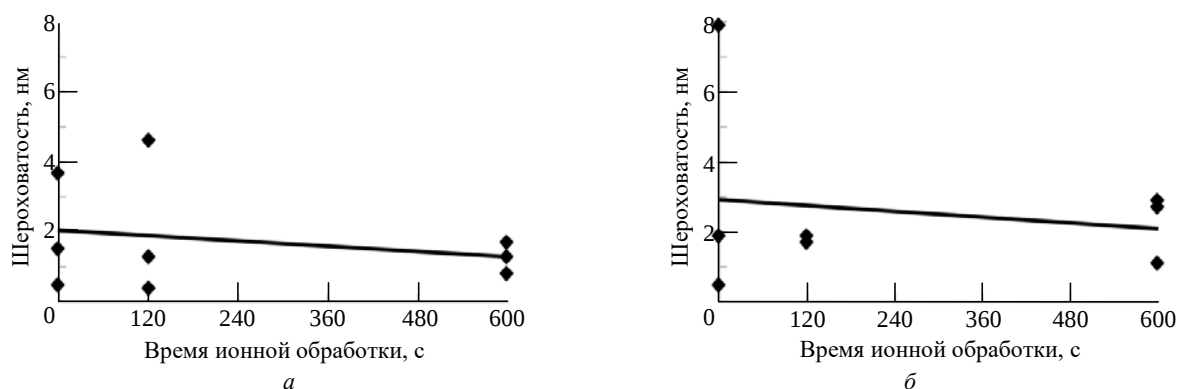


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности подложки (а) и пленки Al_2O_3 толщиной 150 нм (б) от времени ионной обработки

Fig. 4. Dependence of the surface roughness of the substrate (a) and the film Al_2O_3 with a thickness of 150 nm (b) on the duration of ion treatment

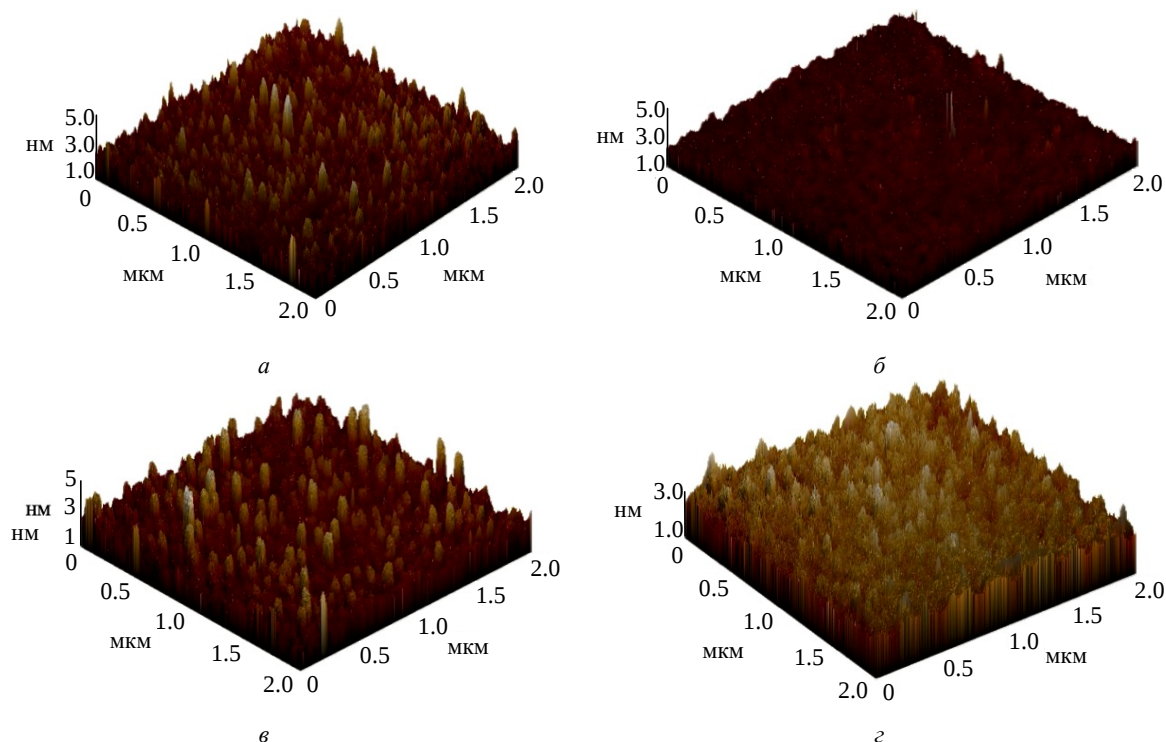


Рис. 5. АСМ-изображения поверхностей пленки Cu толщиной 50 нм после нанесения при времени обработки подложки 0 с (а), 120 с (б); и 100 нм при времени 0 с (в) и 120 с (г)

Fig. 5. AFM-images of Cu thin film 50 nm after treatment intervals of 0 s (a), 120 s (б); and 100 nm after treatment intervals of 0 s (в), 120 s (г)

столбчатых структур для обоих случаев обработки остается одинаково равномерным.

На рис. 6 приведена зависимость шероховатости поверхности пленки меди различной толщины от времени предварительной ионной обработки подложки.

Шероховатость поверхности с наноразмерным слоем меди без ионной обработки подложки больше шероховатости после ионной обработки подложки. Уровень шероховатости по-

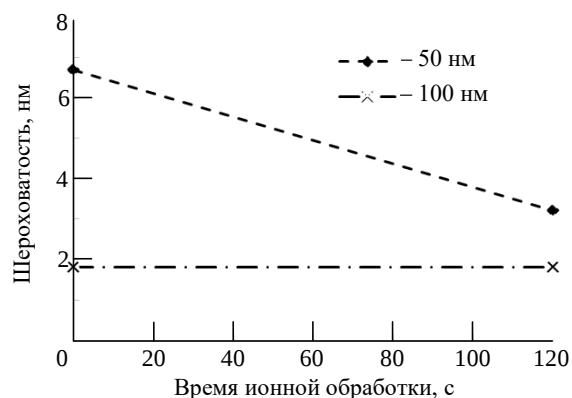


Рис. 6. Зависимость шероховатости пленки Cu от времени предварительной ионной обработки подложки

Fig. 6. Dependence of the Cu film roughness on the duration of ion pretreatment of the substrate

верхности пленки 100 нм сохраняется на значениях 1.8 нм. Для толщины пленки 50 нм параметр шероховатости практически в 2 раза выше – 3.2 нм, что может быть связано с наличием островковых кластеров, которые формируются при высокой скорости осаждения материала при низких температурах (не более 50 °C).

Результаты исследования адгезии покрытий Al_2O_3 и Cu к подложке из Si. На рис. 7 приведено сравнение результатов качественной оценки адгезии пленки оксида алюминия к кремнию при разном времени ионной обработки подложки.

Ионная обработка влияет на качественный уровень степени адгезии пленки к подложке: 50 % образцов без предварительной ионной обработки подложки показали неудовлетворительный уровень адгезии – пленка отклеилась от подложки; для образцов с предварительной ионной обработкой подложки 100 % пленки оставалось на подложке при измерениях.

Из рис. 7, б и г видно, что предварительная ионная обработка подложки перед осаждением позволяет формировать оптически чистые слои без видимых разводов и иных дефектов.

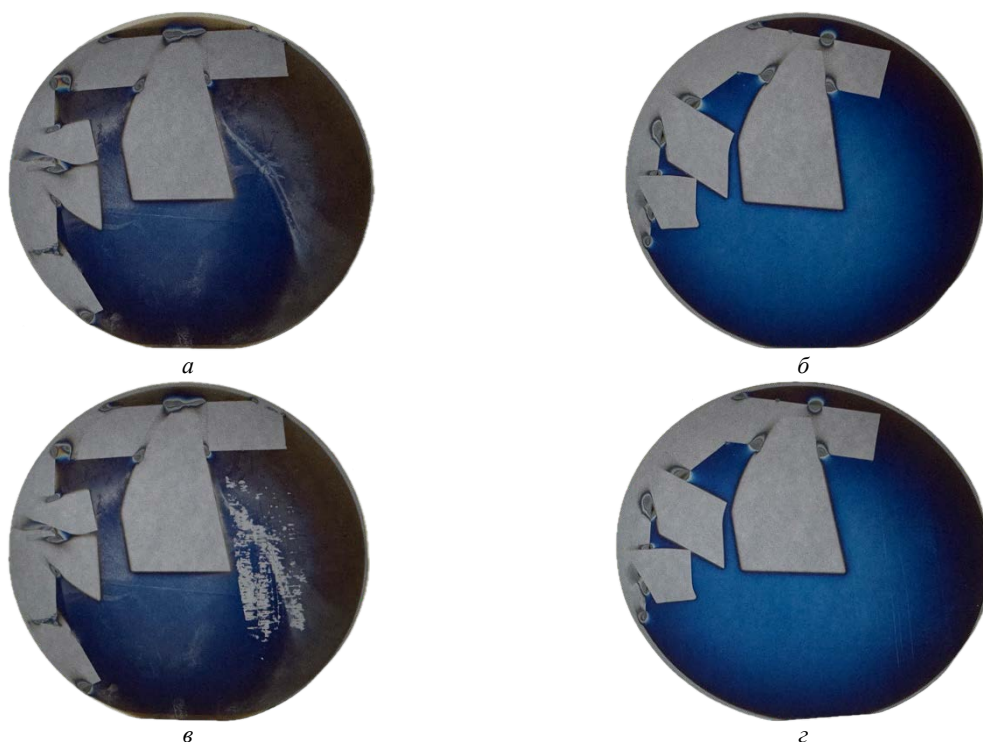


Рис. 7. Оценка адгезии пленки Al_2O_3 к подложке до (а, б) и после (в, г) скрайбирования без предварительной обработки подложки (а, в) и при обработке в течение 120 с (б, г)

Fig. 7. Assessment of the adhesion of the Al_2O_3 film to the substrate before (а, б) and after (в, г) scribing without pretreatment of the substrate (а, в) and during at a processing interval of 120 s (б, г)

Оценка адгезии металлической пленки к подложке кремния является важной операцией, поскольку скорость осаждения металлов по сравнению с оксидами выше, более чем на порядок, а также кристаллическая структура меди является более способной к адгезии по сравнению с аморфными пленками [12]. При выбранных режимах подготовки подложки, методе формирования пленок и технологических параметрах в данном исследовании степень адгезии пленки меди для толщин 50 и 100 нм без ионной обработки и при ионной обработке не показали различий на качественном уровне. Все тонкопленочные структуры остались на подложке, без дефектов при отклеивании скотча от пленки после скрайбирования.

Результаты отработки скоростей осаждения Al_2O_3 и Cu. Оценка скорости осаждения материала на подложку является фундаментальным требованием для формирования изделий с тонкопленочными слоями толщиной менее 500 нм. Существуют различные методики измерения толщины пленки, следовательно, пересчета этого параметра в скорость осаждения: опти-

ческие [13], энергетические [14], зондовые [15] и т. д. В данной статье толщина покрытий измеряется зондовым методом при разном времени осаждения меди и оксида алюминия.

На рис. 8, а представлены результаты измерения толщины пленок в зависимости от времени осаждения, на рис. 8, б – зависимости скорости осаждения от времени осаждения покрытий методом магнетронного распыления.

Средние абсолютные значения скорости осаждения для меди и оксида алюминия составили 25.6 и 0.3 нм/мин соответственно, что необходимо учитывать при последующем формировании тонких пленок с заданными параметрами по толщине слоя.

Результаты расчета геометрии комбинированной мишени. Было проведено моделирование островковой структуры (рис. 9) с характеристическим размером островков 100 нм, чтобы учесть граничные условия проявляющихся размерных эффектов.

Для формирования данной структуры необходимо рассчитать геометрические параметры мишени. Из проведенной отработки режимов фор-

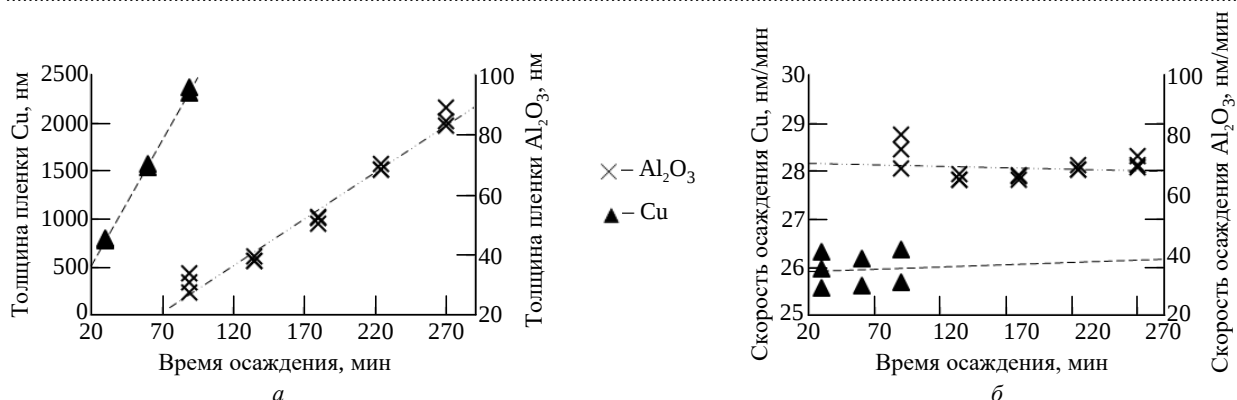


Рис. 8. Зависимости толщины пленки (а) и скорости осаждения (б) от времени работы магнетронного источника

Fig. 8. Dependencies of film thickness (a) and deposition rate (b) on the operating time of the magnetron source

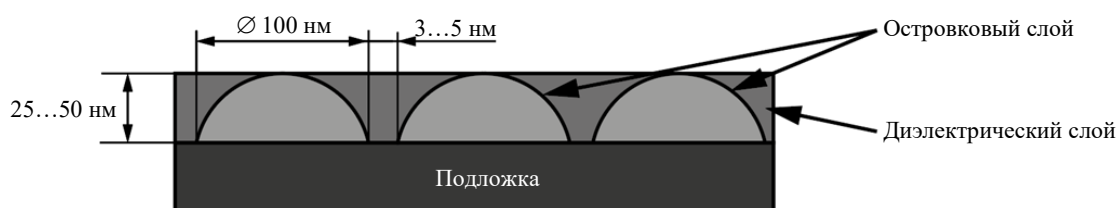


Рис. 9. Структура композиционного слоя диэлектрика с островковыми наноструктурами на подложке

Fig. 9. Structure of a composite dielectric layer with island nanostructures on a substrate

мирования тонкопленочных покрытий видно, что скорость осаждения меди почти на два порядка выше скорости осаждения оксида алюминия.

Распыление происходит не со всей поверхности мишени, а только в зоне эрозии, поэтому для расчета используется площадь зоны эрозии мишени. Принимаем, что осаждение происходит равномерно по всей площади, тогда скорость роста на единицу площади (для удобства расчета используются квадратные миллиметры) будет равна объемной скорости роста. Наиболее плотное заполнение – это заполнение треугольником. Именно оно учитывается при расчете, так как плотность расположения островков является наиболее важным фактором для функциональных слоев устройств.

Объем одного островка:

$$V_{\text{ост}} = \frac{2}{3} \pi R^3 = \frac{2}{3} \pi 50^3 \approx 261\,799 \text{ нм}^3,$$

где R – радиус островка.

Площадь, занимаемая одним островком с учетом пространства между островками:

$$S_{\text{ост}} = 2\sqrt{3} \left(R + \frac{r}{2} \right)^2 = 2\sqrt{3} \left(50 + \frac{3}{2} \right)^2 \approx 9188 \text{ нм}^2,$$

где r – расстояние между островками.

Объем области с одним островком (металла) и материалом матрицы (диэлектрика):

$$V_{\text{общ}} = S_{\text{ост}} R = 2\sqrt{3} \left(50 + \frac{3}{2} \right)^2 50 \approx 459\,400 \text{ нм}^3.$$

Объем заполняющего материала (диэлектрика):

$$V_{\text{диэл}} = V_{\text{общ}} - V_{\text{ост}} = 459\,383 - 261\,799 \approx 197\,600 \text{ нм}^3.$$

Исходя из того, что объем осажденных материалов должен быть равен объему материала в структуре, получаем отношение площадей материала диэлектрика и проводника:

$$\frac{S_{\text{расп Cu}}}{S_{\text{расп Al}_2\text{O}_3}} = \frac{V_{\text{ост}} v_{\text{ос Al}_2\text{O}_3}}{V_{\text{диэл}} v_{\text{ос Cu}}} = \frac{261\,799 \cdot 0.3}{197\,600 \cdot 25.6} \approx 0.0155,$$

где $S_{\text{расп Cu}}$ – площадь распыления меди;

$S_{\text{расп Al}_2\text{O}_3}$ – площадь распыления оксида алюминия; $v_{\text{ос Al}_2\text{O}_3}$ – объемная скорость оса-

ждения оксида алюминия; $v_{\text{ос Cu}}$ – объемная скорость осаждения меди.

Из конструкции магнетрона и экспериментальных данных [12] рассчитано, что площадь зоны эрозии составляет 1178.1 мм^2 . Тогда площадь распыления меди должна составлять 18 мм^2 . Центральный диаметр зоны эрозии составляет 25 мм. Центральный диаметр кольцевой вставки совпадает с центральным диаметром зоны эрозии ($d_{\text{эр}}$), тогда площадь вставки равна:

$$S_{\text{расп Cu}} = \frac{\pi}{4} \left[\left(d_{\text{эр}} + \frac{k}{2} \right)^2 - \left(d_{\text{эр}} - \frac{k}{2} \right)^2 \right],$$

где

$$k = \frac{4S_{\text{расп Cu}}}{\pi \cdot 2d_{\text{эр}}} = \frac{4 \cdot 18}{\pi \cdot 2 \cdot 25} = 0.46 \text{ мм}$$

– ширина кольцевой вставки.

Получаем, что кольцевая вставка должна иметь диаметр 25 мм и ширину кольца 0.46 мм.

Для определения времени осаждения композиционного покрытия необходимо найти суммарную скорость осаждения каждого материала. Скорость осаждения меди, распыленной из медной вставки:

$$\begin{aligned} v_{\text{ос. вст Cu}} &= v_{\text{ос Cu}} \frac{S_{\text{расп Cu}}}{S_{\text{эр}}} = \\ &= 25.6 \frac{18}{1178.1} = 0.39 \text{ нм/мин}, \end{aligned}$$

где $S_{\text{эр}}$ – площадь зоны эрозии.

Скорость осаждения оксида алюминия, распыленного с остаточной площади мишени:

$$\begin{aligned} v_{\text{ос. ост Al}_2\text{O}_3} &= v_{\text{ос Al}_2\text{O}_3} \frac{S_{\text{эр}} - S_{\text{расп Cu}}}{S_{\text{эр}}} = \\ &= 0.3 \frac{1178.1 - 18}{1178.1} = 0.30 \text{ нм/мин}. \end{aligned}$$

Суммарная скорость осаждения композиционного слоя $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$:

$$\begin{aligned} v_{\text{сум}} &= v_{\text{ос. ост Al}_2\text{O}_3} + v_{\text{ос. вст Cu}} = \\ &= 0.39 + 0.30 = 0.69 \text{ нм/мин}. \end{aligned}$$

Тогда время формирования слоя толщиной 50 нм составляет:

$$t = \frac{50}{0.69} = 73 \text{ мин.}$$

Результаты расчета и исследования геометрии композиционного слоя с островковыми наноструктурами. По результатам расчета геометрических параметров мишени получаем, что объем островка зависит от скорости осаждения меди $v_{\text{ос. вст Cu}}$ и времени осаждения t :

$$V_{\text{ост}} = v_{\text{ос. вст Cu}} t S_{\text{ост}}.$$

Выразив площадь островка через геометрические параметры, получим:

$$\frac{2}{3} \pi R^3 = v_{\text{ос. вст Cu}} t \cdot 2\sqrt{3} \left(R + \frac{r}{2} \right)^2. \quad (1)$$

Выразив из (1) радиус островка, получим:

$$R = \frac{0.26}{\pi} A - \frac{0.42B}{\pi A} + \frac{1.73v_{\text{ос Cu}}}{\pi}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \\ &= \left\{ \left[\left(35\pi^3 r^2 v_{\text{ос Cu}} t + 243 \pi r v_{\text{ос Cu}}^2 + 4.4 r^6 v_{\text{ос Cu}}^3 \right)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 4 \left(-15.6 \pi r v_{\text{ос Cu}} - 27 v_{\text{ос Cu}}^2 \right)^3 \right]^{1/2} + \right. \\ &\quad \left. + 35\pi^3 r^2 v_{\text{ос Cu}} t + 243 \pi r v_{\text{ос Cu}}^2 + 4.4 r^6 v_{\text{ос Cu}}^3 \right\}^{1/3}; \\ B &= -15.6 \pi r v_{\text{ос Cu}} - 27 v_{\text{ос Cu}}^2. \end{aligned}$$

Для оценки расчетов были проведены эксперименты по формированию островкового покрытия из комбинированной мишени. Затем полученные образцы исследованы на СЭМ с целью получения информации о геометрических параметрах структуры. Полученные по СЭМ-изображениям размеры и расстояния сопоставлены с (2). На рис. 10 представлено СЭМ-изображение структуры, полученной при формировании из комбинированной мишени в течение 600 с. Как видно из рисунка, структура состоит из островков диаметром 20...25 нм (соответственно, радиусом 10...12.5 нм) с расстоянием между островками 8...15 нм. Проведя расчет по (2), получим, что радиус островков с учетом технологических параметров процесса должен составлять 11.6 нм. Таким образом, экспериментально

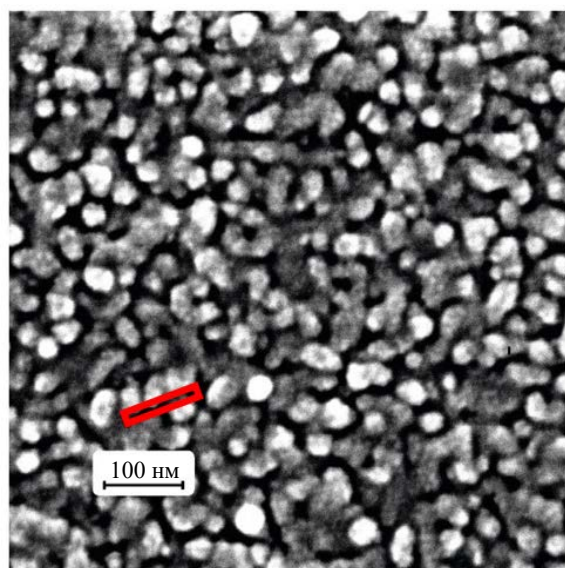


Рис. 10. СЭМ-изображение композиционной структуры $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$ на Si, полученной распылением комбинированной мишени в течение 600 с

Fig. 10. SEM-image of $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$ composite structure on Si obtained by spraying the combined target for 600 s

подтверждена правильность теоретического расчета геометрии островкового покрытия в зависимости от технологических параметров и параметров мишени.

Заключение. Предложен способ формирования композиционного покрытия методом магнетронного распыления из комбинированной мишени со вставками различной геометрии.

Исследовано влияние ионной обработки на поверхность подложки кремния с тонкопленочным покрытием: осаждение покрытия оксида алюминия увеличило среднюю шероховатость поверхности с 1.8 до 2.0 нм, но последующее увеличение времени обработки (120 и 600 с) подложки ионами привело к снижению шероховатости менее 2.0 нм и уменьшению разброса значений, что свидетельствует о более однородной поверхности.

Авторский вклад

Сидорова Светлана Владимировна – определение областей исследования и постановка задачи; обсуждение и анализ результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

Пименов Илья Евгеньевич – расчет геометрических параметров мишени и технологических параметров формирования островковых тонких пленок и наноструктур; изготовление мишени и проведение базовых экспериментов по формированию островковых тонких пленок из комбинированной мишени.

Купцов Алексей Дмитриевич – отработка скорости осаждения покрытий Al_2O_3 и Cu; формирование тонкопленочных покрытий Al_2O_3 и обработка подложек ионным источником; измерение шероховатости поверхности на атомно-силовом микроскопе и адгезии пленок к подложке.

Фельде Анастасия Александровна – формирование тонкопленочных покрытий Cu и обработка подложек ионным источником; измерение шероховатости поверхности подложек с нанесенным покрытием на атомно-силовом микроскопе.

Формирование в вакууме композиционного слоя с островковыми наноструктурами
Composite Layer Formation with Island Nanostructures in Vacuum

Для формирования качественной структуры диэлектрического слоя оксида алюминия с шероховатостью поверхности не более 2 нм рекомендуется предварительно обрабатывать подложку кремния источником ионов в течение 120 с. Предварительная ионная обработка подложки значительно повышает адгезию пленки, предотвращает образование дефектов и улучшает оптическую чистоту.

Исследованы параметры шероховатости металлической медной пленки нанометровой толщины. Шероховатость поверхности покрытия из меди толщиной 50 нм без ионной обработки подложки примерно в 2 раза больше, чем после предварительной ионной обработки (6.4 и 3.2 нм, соответственно). Шероховатость поверхности покрытия из меди толщиной 100 нм без ионной обработки подложки и после предварительной ионной обработки практически не изменяется и составляет 1.8 нм.

На основе экспериментальных данных о скорости роста покрытий из меди (25.9 нм/мин) и оксида алюминия (0.3 нм/мин) проведен расчет геометрии комбинированной мишени с кольцевой вставкой и времени формирования покрытия. Для формирования структуры с островками диаметром 100 нм и расстоянием между островками 3...5 нм кольцевая вставка должна иметь диаметр 25 мм и ширину 0.46 мм, формирование необходимо проводить в течение 73 мин.

Выведена зависимость радиуса островковой структуры от технологических параметров процесса формирования покрытия методом магнетронного распыления из комбинированной мишени с учетом плотной упаковки островковых структур меди в матрице оксида алюминия. Экспериментальные исследования и оценка геометрии полученных структур на СЭМ показали совпадение измеренных размеров с расчетными.

Author's contribution

Svetlana V. Sidorova, definition of research scopes and problem statement; discussion and analysis of the results; management of scientific research; preparation of the paper text.

Ilya E. Pimenov, the geometric parameters calculation of the target and the formation technological parameters of islet thin films and nanostructures; production of a target and conducting basic experiments on the formation of islet thin films from a combined target.

Alexey D. Kouptsov, testing modes the deposition rate of Al_2O_3 and Cu coatings; formation of Al_2O_3 thin film coatings and treatment of substrates with an ion source; measurement of surface roughness on an atomic force microscope and films adhesion to the substrate.

Anastasiya A. Felde, formation of Cu thin film coatings and treatment of substrates with an ion source; measurement of surface roughness of coated substrates on an atomic force microscope.

Список литературы

1. Пат. RU 200183 U1. Островковый тонкопленочный конденсатор / О. Г. Андреасян, С. В. Сидорова; опубл. 08.10.2020. Бюл. № 28.
2. Application of Island Thin Films for Microelectronics Devices / S. V. Kiryanov, N. O. Yurkin, A. D. Kouptsov, S. V. Sidorova // Proc. of the 5th Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 16–18 March 2023. IEEE, 2023. P. 1–6.
doi: 10.1109/REEPE57272.2023.10086877
3. An ultra-capacitor for frequency stability enhancement in small-isolated power systems: Models, simulation and field tests / I. Egido, L. Sigrist, E. Lobato, L. Rouco, A. Barrado // Applied Energy. 2015. Vol. 137. P. 670–676.
doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.041
4. Nano-capacitor-like model using light trapping in plasmonic island embedded microring system / J. Ali, P. Youplao, N. Pornsuwancharoen, M. A. Jalil, S. Chiangga, I. S. Amiri, S. Punthawanunt, M. S. Aziz, G. Singh, P. Yupapin, K. T. V. Grattan // Results in Physics. 2018. Vol. 10. P. 727–730.
doi: 10.1016/j.rinp.2018.07.013
5. Electron exchange between atomic particle and thin metal island films / E. R. Amanbaev, I. K. Gainullin, E. K. Zykova, I. F. Urazgildin // Thin Solid Films. 2011. Vol. 519, iss. 15. P. 4737–4741.
doi: 10.1016/j.tsf.2011.01.026
6. Сидорова С. В. Методы формирования тонких пленок: начальная стадия формирования // Справочник. Инженерный журн. 2011. № 9. С. 13–17.
7. Design of a liquid-phase magnetron sputtering small-sized source for the vacuum coating system MVTU-11-1MS / A. D. Kouptsov, D. D. Vasilev, S. V. Sidorova, K. M. Moiseev // J. of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 1799, № 1. P. 012016.
doi: 10.1088/1742-6596/1799/1/012016
8. Comparative study of plasma and ion-beam treatment to reduce the oxygen vacancies in TiO_2 and recombination reactions in dye-sensitized solar cells / Md. Khaled Parvez, Gi Moon Yoo, Ju Ho Kim, Min Jae Ko, Sung Ryong Kim // Chemical Physics Letters. 2010. Vol. 495, iss. 1–3. P. 69–72.
doi: 10.1016/j.cplett.2010.06.038
9. Donnelly V. M., Kornblit A. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow // J. of Vacuum Science & Technology A. 2013. Vol. 31. P. 050825.
doi: 10.1116/1.4819316
10. Комаровская В. М., Иващенко С. А. Оптимизация режимов ионной обработки поверхности неметаллических материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 3. С. 23–27.
11. Lin K. Y., Low G. H., Chuang I. L. Effects of electrode surface roughness on motional heating of trapped ions // Physical Review A. 2016. Vol. 94, № 1. P. 013418.
doi: 10.1103/PhysRevA.94.013418
12. Kouptsov A., Maltsev V., Sidorova S. Reduction of Residual Stresses in Aluminum Oxide Films by Ion-Plasma Methods // 6th Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 29 Feb.–02 March 2024. IEEE, 2024. P. 1–4.
doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479846
13. Harrick N. J. Determination of refractive index and film thickness from interference fringes // Applied optics. 1971. Vol. 10, iss. 10. P. 2344–2349.
doi: 10.1364/AO.10.002344
14. Синтез нанокристаллических пленок гидроксипатита / В. М. Иевлев, Э. П. Домашевская, В. А. Терехов, В. М. Кашкаров, В. М. Вахтель, Ю. Д. Третьяков, В. И. Путляев, С. М. Баринев, В. В. Смирнов, Е. К. Белоногов, А. В. Костюченко // Конденсированные среды и межфазные границы. 2007. Т. 9, № 3. С. 209–215.
15. Дедкова А. А., Киреев В. Ю., Махиборода М. А. Возможности и ограничения метода контактной профилометрии при определении перепада высот для контроля топологических элементов и толщины слоев // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2020. Т. 20, № 2. С. 23–40.
doi: 10.31145/2224-8412-2020-20—2-23-40

Информация об авторах

Сидорова Светлана Владимировна – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баума-

на. Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; тонкопленочные покрытия и наноразмерные структуры; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: sidorova@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3002-1246>

Пименов Илья Евгеньевич – инженер-конструктор силовой электроники, аспирант ФГУП "НАМИ". Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов: микроэлектроника; СВЧ-электроника; накопители энергии; силовые установки транспортных средств; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: ФГУП "НАМИ", ул. Автомоторная, д. 2, Москва, 125438, Россия

E-mail: iliya.pimenov@nami.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9268-0206>

Купцов Алексей Дмитриевич – инженер, аспирант кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 36 научных работ. Сфера научных интересов: микроэлектроника; атомно-силовая микроскопия; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: alex-kouptsov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3997-9722>

Фельде Анастасия Александровна – магистрант 1-го года обучения кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов: атомно-силовая микроскопия; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: feldeaa@student.bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4051-4774>

References

1. Sidorova S. V., Andreasyan O. G. Island Thin-Film Capacitor. Pat. RU 200183 U1. Publ. 08.10.2020. Bull. no. 28.
2. Kiryanov S. V., Yurkin N. O., Kouptsov A. D., Sidorova S. V. Application of Island Thin Films for Microelectronics Devices. Proc. of the 5th Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 16–18 March 2023. IEEE, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/REEPE57272.2023.10086877
3. Egido I., Sigrist L., Lobato E., Rouco L., Barado A. An Ultra-Capacitor for Frequency Stability Enhancement in Small-Isolated Power Systems: Models, Simulation and Field Tests. Applied Energy. 2015, vol. 137, pp. 670–676. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.041
4. Ali J., Youplao P., Pornsuwancharoen N., Jalil M. A., Chiangga S., Amiri I. S., Punthawanunt S., Aziz M. S., Singh G., Yupapin P., Grattan K. T. V. Nano-Capacitor-Like Model Using Light Trapping in Plasmonic Island Embedded Microring System. Results in Physics. 2018, vol. 10, pp. 727–730. doi: 10.1016/j.rinp.2018.07.013
5. Amanbaev E. R., Gainullin I. K., Zykova E. K., Urazgildin I. F. Electron Exchange between Atomic Particle and Thin Metal Island Films. Thin Solid Films. 2011, vol. 519, iss. 15, pp. 4737–4741. doi: 10.1016/j.tsf.2011.01.026
6. Sidorova S. V. Thin Films Producing Methods: The Initial Stage. Handbook. An Engineering J. 2011, no. 9, pp. 13–17.
7. Kouptsov A. D., Vasilev D. D., Sidorova S. V., Moiseev K. M. Design of a Liquid-Phase Magnetron Sputtering Small-Sized Source for the Vacuum Coating System MVTU-11-1MS. J. of Physics: Conf. Series. 2021, vol. 1799, no. 1, p. 012016. doi: 10.1088/1742-6596/1799/1/012016
8. Md. Khaled Parvez, Gi Moon Yoo, Ju Ho Kim, Min Jae Ko, Sung Ryong Kim. Comparative Study of Plasma and Ion-Beam Treatment to Reduce the Oxygen Vacancies in TiO₂ and Recombination Reactions in Dye-Sensitized Solar Cells. Chemical Physics Letters. 2010, vol. 495, iss. 1–3, pp. 69–72. doi: 10.1016/j.cplett.2010.06.038
9. Donnelly V. M., Kornblit A. Plasma Etching: Yesterday, Today, and Tomorrow. J. of Vacuum Science & Technology A. 2013, vol. 31, p. 050825. doi: 10.1116/1.4819316
10. Komarovskaya V. M., Ivashchenko S. A. Optimization of Ion Treatment Conditions for Non-Metal Surfaces. Hardening Technologies and Coatings. 2013, no. 3, pp. 23–27. (In Russ.)
11. Lin K. Y., Low G. H., Chuang I. L. Effects of Electrode Surface Roughness on Motional Heating of Trapped Ions. Physical Review A. 2016, vol. 94, no. 1, p. 013418. doi: 10.1103/PhysRevA.94.013418
12. Kouptsov A., Maltsev V., Sidorova S. Reduction of Residual Stresses in Aluminum Oxide Films by Ion-Plasma Methods. 6th Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 29 Feb.–02 March 2024. IEEE, 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479846
13. Harrick N. J. Determination of Refractive In-

dex and Film Thickness from Interference Fringes. Applied optics. 1971, vol. 10, iss. 10, pp. 2344–2349.

14. Ievlev V. M., Domashevskaya E. P., Terekhov V. A., Kashkarov V. M., Vakhtel V. M., Tret'yakov Yu. D., Putlyaev V. I., Barinov S. M., Smirnov V. V., Belonogov E. K., Kostyuchenko A. V. Synthesis of Nanocrystalline Hydroxyapatite Films. Condensed Media and Interphase Boundaries. 2007, vol. 9, no. 3, pp. 209–215. (In Russ.)

15. Dedkova A. A., Kireev V. Yu., Makhboroda M. A. Possibilities and Limitations of the Contact Profilometry Method in Determining the Height Difference for Monitoring Topological Elements and Layer Thickness. Nanostructures. Mathematical Physics and Modeling. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 23–40. (In Russ.)
doi: 10.31145/2224-8412-2020-20—2-23-40

Information about the authors

Svetlana V. Sidorova, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; thin-film coatings and nanoscale structures; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 2nd Bauman St., 5, build. 1, Moscow 105005, Russia

E-mail: sidorova@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3002-1246>

Ilya E. Pimenov, power electronics design engineer, postgraduate student at Federal State Unitary Enterprise "NAMI". The author of more than 15 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; microwave electronics; energy storage; power plants of vehicles; vacuum technological processes and equipment.

Address: Federal State Unitary Enterprise "NAMI", Avtomotornaya St., 2, Moscow 125438, Russia

E-mail: iliya.pimenov@nami.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9268-0206>

Alexey D. Kouptsov, Engineer, Postgraduate student of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of 36 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; atomic force microscopy; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 2nd Bauman St., 5, build. 1, Moscow 105005, Russia

E-mail: alex-kouptsov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3997-9722>

Anastasiya A. Felde, 1st year Master's degree of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: atomic force microscopy; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 2nd Bauman St., 5, build. 1, Moscow 105005, Russia

E-mail: feldeaa@student.bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4051-4774>

Применение технологии цифрового двойника в информационно-измерительных системах

В. А. Баронова[✉], Н. В. Романцова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] vasilisabaron@gmail.com

Аннотация

Введение. Статья посвящена созданию автоматизированной системы сбора данных узла учета тепловой энергии теплосети и разработке цифровой модели данной системы. Цифровые двойники широко используются в энергетике для оптимизации работы теплоэлектроцентралей (ТЭЦ): своевременного технического ремонта, прогнозирования различных аварийных сценариев, планирования производства тепловой энергии. Приводятся примеры рассматриваемых автоматизируемых систем, внедренные в производство. Актуальность работы заключается в возможности прогнозирования размеров дефектов трубопровода на основании измерительных данных и данных цифрового двойника.

Цель работы. Разработка распределенной информационно-измерительной системы контроля теплоснабжения с внедрением цифрового двойника.

Материалы и методы. Данные о теплоносителе: температура, давление и расход моделируются по нормальному закону распределения согласно тепловому графику ТЭЦ. Представлено математическое и алгоритмическое обеспечение для прогнозирования состояния технологического оборудования на основе данных о теплоносителе. Прогнозируется глубина каверны, возникающая в трубопроводе. В качестве критерия предельного состояния используется условие прочности. Для определения предельного действующего напряжения в стенке трубы используются ОСТ 153-39.4-010–2002 и формула Барлоу.

Результаты. Были разработаны цифровой двойник системы контроля теплоснабжения; структура распределенной информационно-измерительной системы для узла контроля теплоснабжения; алгоритмическое и программное обеспечение для работы распределенной информационной системы; алгоритмическое и программное обеспечение для прогнозирования состояния трубопровода; проведена проверка работоспособности программного обеспечения в нормальном режиме работы и в режиме невозможности установления связи с сервером.

Заключение. Применение технологии цифрового двойника в системе контроля теплоснабжения позволяет оптимизировать тепловой график объекта путем моделирования оптимальных значений теплоносителя, исходя из параметров окружающей среды, с погрешностью моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды от -8 до $+3^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: цифровой двойник, узел учета теплоснабжения, распределенная измерительная система, моделирование данных, прогноз язвенной коррозии трубопровода

Для цитирования: Баронова В. А., Романцова Н. В. Применение технологии цифрового двойника в информационно-измерительных системах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 107–116.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-107-116

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, а также гранта Санкт-Петербургского научного фонда (договор № 24-29-20064 от 22.05.2024).

Статья поступила в редакцию 10.07.2024; принята к публикации после рецензирования 19.03.2025; опубликована онлайн 30.04.2025



Application of Digital Twin Technology in Information and Measurement Systems

Vasilisa A. Baronova ✉, Natalia V. Romantsova

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ vasilisabaron@gmail.com

Abstract

Introduction. The article addresses the problem of creating an automated system for data collection from heat metering units, as well as a digital twin of such a system. Digital twins are widely used in the energy sector to optimize the operation of thermal power plants, including their timely maintenance, forecasting various emergency scenarios, or planning thermal energy production. Practical examples of such systems are presented. The relevance of this work lies in the possibility of predicting the size of pipeline defects based on both measurement and digital twin data.

Aim. Development of a distributed information and measurement system for heat supply monitoring with the introduction of a digital twin.

Materials and methods. The parameters of the heat-carrying agent, such as temperature, pressure, and flow, were simulated according to the normal distribution law and the thermal schedule of power plants. This information was further used to develop a mathematical and algorithmic support for predicting the state of technological equipment. The depth of a cavity defect which may occur in the pipeline was predicted. The strength condition was used as a criterion for the failure limit state. To determine the ultimate strength of the pipe wall, OST 153-39.4-010-2002 and the Barlow formula were used.

Results. The obtained results include a digital twin of the heat supply control system, the structure of a distributed information and measurement system for the unit of heat supply monitoring, algorithmic and software systems for the operation of the distributed information and measurement system and for predicting the failure state of the pipeline. The software operability was verified in normal operation and in the absence of access to the server.

Conclusion. The use of digital twin technology in heat supply monitoring makes it possible to optimize the thermal graph of the object by simulating the optimal values of the heat-carrying agent based on environmental parameters with an error in modeling the water temperature in the supply pipeline of $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ at ambient temperatures from -8 to $+3^\circ\text{C}$.

Keywords: digital twin, heat metering unit, distributed information and measurement system, data simulation, forecast of internal corrosion of the pipeline

For citation: Baronova V. A., Romantsova N. V. Application of Digital Twin Technology in Information and Measurement Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 107–116.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-107-116

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, and a grant from the St Petersburg Science Foundation (agreement № 24-29-20064 dated 05/22/2024).

Submitted 10.07.2024; accepted 19.03.2025; published online 30.04.2025

Введение. В настоящее время во многих отраслях промышленности компании ведут учет данных о производительности оборудования. Использование цифровых двойников может позволить компаниям быстрее решать физические проблемы, обнаруживать их с гораздо большей степенью точности, проектировать и создавать более качественные продукты. В области тепловой энергетики [1] цифровой двойник поможет оптимизировать работу тепло-

электроцентралей, предотвращать сбои в подаче тепловой энергии и рационально подходить к ее потреблению.

Использование автоматизированных систем сбора данных позволяет решать следующие производственные задачи в теплоэнергетике:

- измерение мгновенных и усредненных значений параметров контролируемых объектов;
- контроль использования теплоресурсов;
- сокращение времени сбора и обработки

измерительных данных;

- ведение архива измерительных данных;
- поддержка управляющих решений;
- обеспечение безаварийного режима работы объекта;
- формирование отчетов коммерческого учета тепла на основе архивных данных.

Автоматизированные системы контроля в области теплоэнергетики успешно разрабатываются и реализуются.

Автоматизированная система учета тепловой энергии на Новосибирской ТЭЦ-4 осуществляет отображение текущих параметров теплоносителя, архивирование данных, контроль аварийных изменений параметров и их сигнализацию, формирование отчетных документов.

Автоматизированная система коммерческого и технического учета энергоресурсов Чебоксарской ТЭЦ-2 выполняет измерение, сбор и визуализацию параметров теплоносителя, ведение архивов данных и формирование отчетов, сигнализирование об отклонении параметров теплоносителя от заданных, передачу данных в центр сбора технологической информации.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) ТЭЦ "Белый Ручей" поселка Депо выполняет визуализацию параметров технологического процесса, мониторинг температурных и гидравлических данных, хранение и архивирование данных, автоматическое управление и регулирование технологических процессов [2].

Описанные автоматизированные системы выполняют контроль и учет параметров теплоносителя. Однако такие системы не позволяют прогнозировать состояние контролируемого объекта и оценивать остаточный ресурс. Разработанная система дает возможность рассчитывать параметры прогнозируемого дефекта трубопровода и вырабатывать управляющее решение в зависимости от полученных значений.

Цифровой двойник системы контроля теплоснабжения. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического объекта, предназначенная для моделирования его поведения [3–6]. Разработанный цифровой двойник моделирует работу узла учета тепловой энергии. На рис. 1 представлено условное изображение исследуемого объекта.



Рис. 1. Исследуемый объект

Fig. 1. Study subject

Для учета теплоэнергии и контроля качества подачи теплоснабжения измеряют следующие параметры: t_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе; p_1 – давление теплоносителя в подающем трубопроводе; R_1 – расход теплоносителя в подающем трубопроводе; t_2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе; p_2 – давление теплоносителя в обратном трубопроводе; R_2 – расход теплоносителя в обратном трубопроводе; t_3 – температура воздуха в колодце обратного трубопровода; F_3 – влажность воздуха в колодце обратного трубопровода.

В качестве моделируемого объекта будем рассматривать ТЭЦ-15 ПАО "ТГК-1". Зона теплоснабжения ТЭЦ-15 распространяется на Кировский, Адмиралтейский и Центральный районы Санкт-Петербурга. Теплофикационная установка ТЭЦ-15 предназначена для снабжения потребителей теплом и горячей водой по открытой схеме с непосредственным водоразбором от старой очереди и блочной части ТЭЦ. Нагрев сетевой и подпиточной воды осуществляется в бойлерах до 110 °С и при необходимости, в зависимости от температуры наружного воздуха, в водогрейных котлах до максимальной температуры 130 °С [7].

На рис. 2 представлен температурный график ТЭЦ-15 ТМ "Автовская" на отопительный сезон 2018/19 г. [8].

Температура теплоносителя в прямом трубопроводе зависит от температуры наружного воздуха. При понижении температуры окружающей среды температуру теплоносителя увеличивают для обеспечения соблюдения норм СанПиН.

Данные о теплоносителе являются случайными величинами и моделируются по следую-

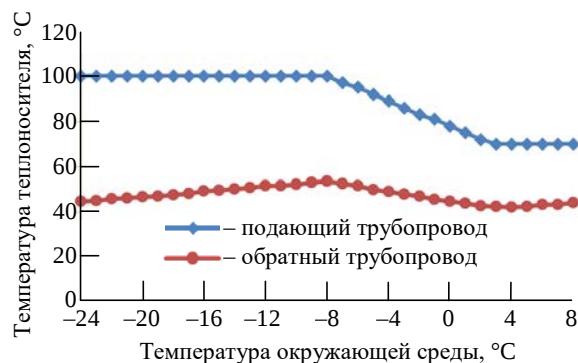


Рис. 2. Температурный график тепломатриалы "Автотская"

Fig. 2. Heating curve of the Avtovo heating system

щему принципу: значение температуры теплоносителя моделируется согласно температурному графику ТЭЦ в зависимости от температуры окружающей среды, значение которой считывается с онлайн-сервиса прогноза погоды. Несоответствие прогноза погоды реальным значениям температуры окружающей среды будет приводить к погрешности моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды от -8 до $+3^\circ\text{C}$. В остальной части диапазона устанавливается постоянное значение температуры воды в подающем трубопроводе, и погрешность измерения температуры окружающей среды не влияет на моделируемое значение. Особенности расчета погрешности приведены в [9].

Значения давления и расхода теплоносителя моделируются как нормально распределенные величины с математическим ожиданием параметра, характерным для ТЭЦ-15.

Для моделирования нормально распределенной случайной величины используется метод Бокса–Мюллера, который позволяет получить два независимых значения x_1 и x_2 нормальной случайной величины из двух независимых значений z_1 и z_2 равномерной случайной величины для подающего и обратного трубопроводов:

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt{-2\ln(z_1)} \sin(2\pi z_2); \\ x_2 = \sqrt{-2\ln(z_1)} \cos(2\pi z_2). \end{cases}$$

К полученным значениям добавляется аддитивная и случайная составляющие погрешности. Случайная составляющая погрешности моделировалась выборочно по следующим законам распределения: равномерный, Гаусса, Симпсона.

Интеграция технологии цифрового двойника в распределенную систему контроля теплоснабжения. Разработанный цифровой двойник системы внедряется в распределенную информационно-измерительную систему контроля теплоснабжения. Структура данной измерительной системы представлена на рис. 3.

Нижний уровень системы представлен датчиками температуры, давления и расхода для прямой и обратной ветвей трубопровода. Датчики подключаются к устройству сбора данных (программируемый логический контроллер – ПЛК), которое представляет собой промышленный контроллер с поддержкой протокола Modbus. На верхнем уровне системы осуществляется обработка и управление измерительными данными.

На основе полученных измерительных данных осуществляется прогнозирование технологического состояния оборудования. При обрыве связи с сервером измерительные данные моделируются цифровым двойником.

На рис. 4 представлен граф состояний, описывающий работу системы.

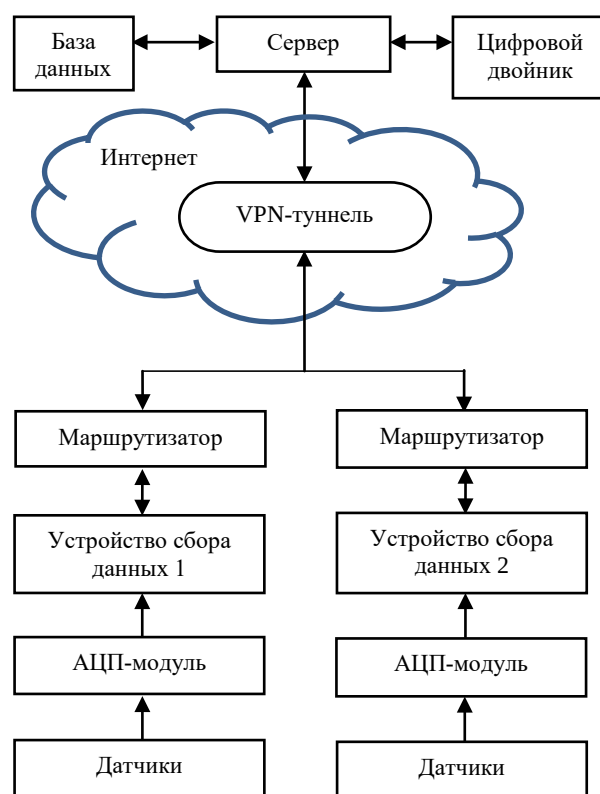


Рис. 3. Структура распределенной измерительной системы контроля теплоснабжения

Fig. 3. Structure of a distributed measuring system for heat supply monitoring



Рис. 4. Граф состояний работы системы

Fig. 4. Graph of system operation states

Большую часть времени система находится в ожидании времени начала измерения. Измерения происходят каждые 20 мин: 0, 20, 40 мин каждого часа. Такая периодичность определяется особенностью измерения значений расхода R_1 , R_2 теплоносителя, которые являются усредненными оценками за выбранное время. Полученные значения записываются в память программируемого логического контроллера. Если ТСР-соединение устанавливается, то данные считываются из памяти ПЛК. Если возникает ошибка установления ТСР-соединения, то измерительные данные моделируются. На основании полученных данных осуществляется прогнозирование состояния трубопровода. Все полученные значения записываются в базу данных. Затем система возвращается в состояние ожидания.

Для записи измеренных значений в память контроллера была разработана программа на языках МЭК: SFC, ST, IL. Используемый ПЛК фирмы WAGO имеет энергонезависимую память объемом 24 Кбайт и следующий диапазон адресов, доступных для записи: %MW0...%MW12287. Для идентификации измерений необходимо записывать следующие данные: дата и время измерения, номер измерительного канала, измеренное значение. Для записи одного кортежа из восьми измеряемых параметров требуется 42 байт. Для хранения записей с результатами измерения за сутки необходимо 2.9 Кбайт. Следовательно, архив будет содержать записи измеренных значений для восьми полных дней. Запись в память осуществляется сдвигом указателя на текущую ячейку памяти на двойное слово. Для этого создается указатель-итератор

сдвига, который после каждой записи сравнивается с его максимальным значением. При превышении максимально установленного значения итератора 12095 ему присваивается значение 1, что указывает на адрес %MW0. Также программа предусматривает измерение мгновенных параметров и их усреднение за время между основными измерениями.

Прогнозирование состояния трубопровода. На трубопроводы, расположенные под землей, действует внешняя коррозия, обусловленная составом почвы, ее температурой и влажностью. Также действует внутренняя коррозия, скорость которой зависит от характеристик транспортируемого продукта.

Монтаж тепломагистрали в непроходном канале и наличие тепловой изоляции препятствуют образованию внешней коррозии трубопровода. В дальнейшем будем учитывать влияние внутренней коррозии на состояние труб [10].

Металлы подвергаются следующим видам коррозии:

- 1) равномерная, которая характеризуется небольшой глубиной и охватывает всю площадь поверхности металла;
- 2) пятнами, которая характеризуется небольшой глубиной и большой площадью локализации на отдельных частях поверхности металла;
- 3) язвенная, характеризуемая относительно большой глубиной проникновения в материал, диаметр язвы сопоставим с глубиной;
- 4) точечная, характеризуемая небольшой площадью относительно глубины проникновения в материал.

Наибольшую опасность для трубопровода представляют язвенная и точечная коррозия, поскольку они имеют большую скорость проникновения в материал относительно других видов, что может привести к образованию сквозных отверстий и, как следствие, к возникновению аварийной ситуации.

Для трубопроводов, подверженных коррозии, критерием предельного состояния будет являться условие прочности согласно [11]:

$$[\sigma] \geq \sigma_d, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, взятое из ГОСТ 14249–89; σ_d – действующее напряжение в стенке сосуда.

Действующее напряжение в стенке трубы от рабочего давления определяется по формуле Барлоу [12]:

$$\sigma_d = \frac{pD}{2S}, \quad (2)$$

где p – давление в трубе; D – диаметр трубы; S – толщина стенки трубы.

В данной статье рассматривается влияние одиночной язвы. В вершине дефекта возникает локальное перенапряжение при наличии рабочего давления в стенке трубы, тогда неравенство (1) будет выглядеть следующим образом:

$$[\sigma] \geq \alpha_\sigma \sigma_{\text{нетто}}, \quad (3)$$

где α_σ – коэффициент концентрации напряжений; $\sigma_{\text{нетто}}$ – напряжение в сечении, где находится язва, определяется согласно (2).

Для одиночных язв выражение для коэффициента концентрации имеет вид, представленный в [13]. При расчетах принимаем, что язва имеет сферическую форму, тогда коэффициент концентрации напряжений можно выразить следующим образом:

$$\alpha_\sigma = 1 + 3.57 \cdot 0.5 \left[\frac{1.12 - 0.9 \cdot 0.5}{1 - a/S(1 - 1.5 \cdot 0.5)} \right],$$

где a – глубина каверны.

Глубина дефекта a пропорциональна скорости коррозии (v_k). Скорость язвенной коррозии зависит от температуры t_1 , давления p_1 и расхода R_1 теплоносителя. Скорость коррозии за время между измерениями рассчитывается согласно [14]. Для расчета глубины язвы a_0 , образовавшейся ко времени проведения первого измерения τ_0 , принимаем среднюю скорость язвенной коррозии 0.18 мм/г при учете круглосуточной работы теплосетей со среднегодовой температурой теплоносителя 60 °C [14] и среднем pH ≈ 8.7 [15]. После проведенных расчетов на основании неравенства (3) делается вывод о выработке управляющего решения.

На рис. 5 представлен алгоритм для расчета глубины образовавшегося дефекта и выработки управляющего решения.

Результаты. В ходе работы были получены следующие результаты:

1) разработан цифровой двойник системы контроля теплоснабжения;

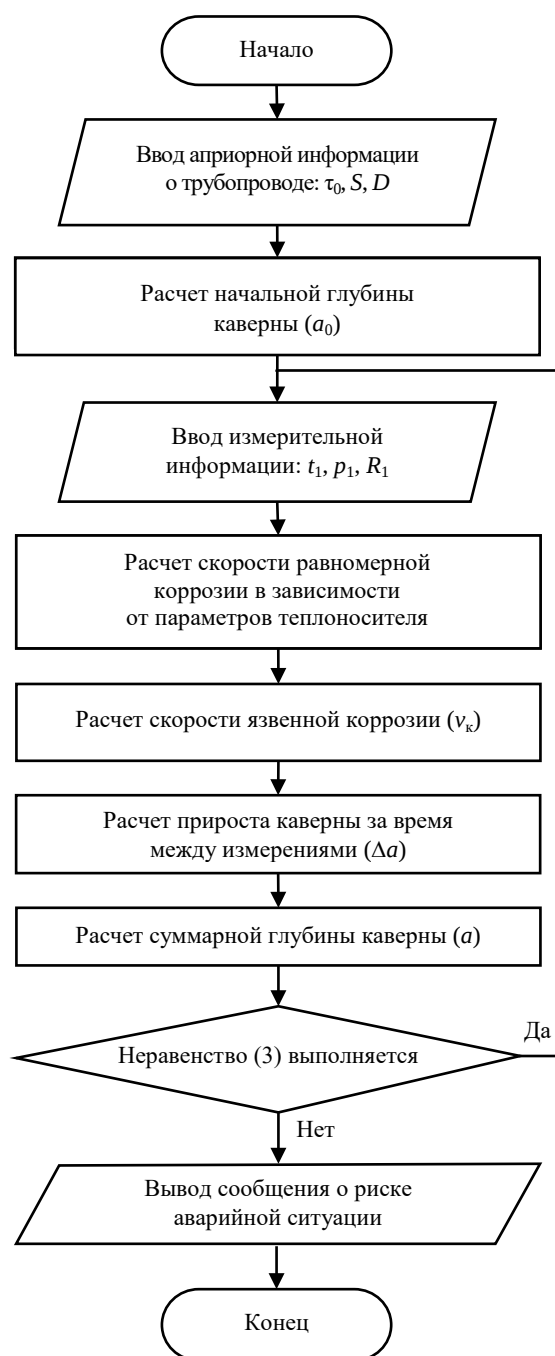


Рис. 5. Алгоритм расчета глубины язвенной коррозии
Fig. 5. Algorithm for calculating the depth of pitting corrosion

2) разработана структура распределенной информационно-измерительной системы для узла контроля теплоснабжения;

3) разработано алгоритмическое и программное обеспечение для работы распределенной информационной системы;

4) разработано алгоритмическое и программное обеспечение для прогнозирования состояния трубопровода;

id	GUID	TimeStamp	DeviceType	DeviceSpetif	MeasureVal1	MeasureVal1	MeasureVal1	Error
34	6553565534	22-04-2024T17:10:10	T11	ТПУ 205	°C		40	0,2 no
35	6553565534	22-04-2024T17:10:10	T21	ТПУ 205	°C		40	0,2 no
36	6553565534	22-04-2024T17:10:10	P11	ПДТВХ-1-02	МПа		0	0 no
37	6553565534	22-04-2024T17:10:10	P21	ПДТВХ-1-02	МПа		0	0 no
38	6553565534	22-04-2024T17:10:10	R11	Акрон-01	м3/час		0	0 no
39	6553565534	22-04-2024T17:10:10	R21	Акрон-01	м3/час		0	0 no
40	6553565534	22-04-2024T17:10:10	T31	ИБТМ-7 Н темп	°C		20	1 no
41	6553565534	22-04-2024T17:10:10	F31	ИБТМ-7 Н влаж	%		20	1 no
42	6553565534	22-04-2024T17:20:10	T11	ТПУ 205	°C		71	0,4 Error
43	6553565534	22-04-2024T17:20:10	T21	ТПУ 205	°C		45,3	0,23 Error
44	6553565534	22-04-2024T17:20:10	P11	ПДТВХ-1-02	МПа		1,01	0 Error
45	6553565534	22-04-2024T17:20:10	P21	ПДТВХ-1-02	МПа		0,25	0 Error
46	6553565534	22-04-2024T17:20:10	R11	Акрон-01	м3/час		3482,51	0,04 Error
47	6553565534	22-04-2024T17:20:10	R21	Акрон-01	м3/час		3397,41	0,04 Error
48	6553565534	22-04-2024T17:20:10	T31	ИБТМ-7 Н темп	°C		12	1 Error
49	6553565534	22-04-2024T17:20:10	F31	ИБТМ-7 Н влаж	%		64	1 Error

Рис. 6. Запись измерительных данных в базу

Fig. 6. Recording of measurement data in the database

id	GUID	TimeStamp	Corrosion fo	Corrosion depth
1	6553565534	22-04-2024T16:30:10	0,000001	1,260002
2	6553565534	22-04-2024T16:40:10	0,000001	1,260002
3	6553565534	22-04-2024T16:50:10	0,000006	1,260002
4	6553565534	22-04-2024T17:00:10	0,000006	1,260015
5	6553565534	22-04-2024T17:10:10	0,000001	1,260015
6	6553565534	22-04-2024T17:20:10	0,000006	1,260023

Рис. 7. Запись прогнозируемых данных в базу

Fig. 7. Recording of predicted data in the database

5) проведена апробация разработанного программного обеспечения в условиях обрыва линии связи.

На рис. 6 и 7 представлены таблицы из базы данных с записью измеренных параметров.

В базу записываются следующие данные об измерении: id, id измерительной системы, время измерения, тип измерительного прибора, спецификация прибора, единица измерения, измеряемая величина, погрешность измерения, состояние канала измерения.

Графа Error показывает состояние канала в момент записи значений. Запись Error обозначает повреждение канала связи, следовательно, измерительные данные в строках 42–49 были смоделированы цифровым двойником системы.

В таблицу прогнозирования состояния трубопровода записываются следующие данные: id, id измерительной системы, время измерения, прогноз прироста коррозии, прогноз общей глубины коррозии.

Оценку погрешности прогнозируемой величины каверны будем производить на основе средней скорости язвенной коррозии 0.18 мм/г и средней температуры теплоносителя 60 °C. Рассчитаем и примем за действительное значение прироста каверны за 10 мин, равное $7 \cdot 10^{-6}$ мм. Из данных,

приведенных на рис. 7 в строке 6 (соответствует измерительным данным в строках 42–49 на рис. 6), видно, что расчетное значение, полученное на основе смоделированных данных при температуре теплоносителя 71 °C, составляет $6 \cdot 10^{-6}$ мм.

Исходя из того, что погрешность несоответствия прогноза погоды реальным значениям температуры окружающей среды приводит к погрешности моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5$ °C, можно рассчитать приrost коррозии в соответствии с измерительными данными в строках 42–49 на рис. 6. Рассмотрим максимальное и минимальное значения погрешности прогнозирования каверны на основе данных цифрового двойника. Прогнозируемый приrost каверны составляет: при 70 °C – $6.4 \cdot 10^{-6}$ мм; при 75 °C – $6.8 \cdot 10^{-6}$ мм; при 95 °C – $8.7 \cdot 10^{-6}$ мм; при 100 °C – $9.3 \cdot 10^{-6}$ мм. Таким образом, минимальная погрешность прогнозирования прироста каверны при использовании данных цифрового двойника будет составлять $\Delta a = \pm 0.4 \cdot 10^{-6}$ мм, а максимальная погрешность будет составлять $\Delta a = \pm 0.6 \cdot 10^{-6}$ мм.

При прогнозировании коррозионного износа рекомендуется применять модель, которая прогнозирует большую глубину дефекта. Из полученных значений и их малых расхождений можно сделать вывод, что модель адекватно описывает прогнозируемый приrost каверны как при использовании измерительных данных, так и при использовании цифрового двойника.

Заключение. Применение технологии цифрового двойника в системе контроля теплоснабжения позволяет оптимизировать теп-

ловой график объекта путем моделирования оптимальных значений теплоносителя, исходя из параметров окружающей среды, с погрешностью моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды от -8 до $+3^\circ\text{C}$. В остальной части диапазона температур окружающей среды неточность определения воздуха не влияет на моделируемое значение теплоносителя.

Разработанный алгоритм прогнозирования технологического состояния оборудования помогает вырабатывать управляющее решение о ремонте трубопровода для предупреждения аварийных ситуаций, таких как прорыв трубопровода. Расчет размеров дефекта выполнен основе априорной информации о трубопроводе: количестве лет в эксплуатации, диаметре и толщине стенки трубы и параметрах теплоносителя: температуре, давлении, расходе и его pH.

Список литературы

1. Информационно-измерительная система узла контроля магистрального теплопровода / В. В. Алексеев, В. С. Коновалова, Н. В. Романцова, А. В. Царёва // Мягкие измерения и вычисления. 2022. Т. 54, № 5. С. 16–26.
doi: 10.36871/2618-9976.2022.05.002
2. Куликов А. Н., Угроватов А. Ю., Углов П. В. Мини-ТЭЦ – объекты малой энергетики, и как их автоматизировать // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2023. Т. 80, № 5. С. 26–29.
3. Сосфенов Д. А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 35–43.
doi: 10.25198/2077-7175-2023-4-35
4. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyberphysical manufacturing / Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.-S. Lee // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 10. P. 1031–1042.
doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
5. Adaptive federated learning and digital twin for industrial internet of things / W. Sun, S. Lei, L. Wang, Z. Liu, Y. Zhang // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17, № 8. P. 5605–5614.
doi: 10.1109/TII.2020.3034674
6. Jeon S. M., Schuesslbauer S. Digital Twin Application for Production Optimization // IEEE Intern. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 14–17 Dec. 2020. IEEE, 2020. P. 542–545.
doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309874
7. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на 2020 г. Т. 1 (ч. 1, 2.1). URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/08/26/27/%D1%82%D0%BE%D0%BC_1_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8_1_2..pdf (дата обращения: 04.04.2024).
8. График регулирования отпуска тепла от ТЭЦ филиала "Невский" ПАО ТГК-1 на отопительный сезон 2018/2019 гг. URL: https://energomonitring.com/wp-content/uploads/2019/02/2018_grafik_regulirovaniya_Teploset.pdf (дата обращения: 04.04.2024).
9. Baronova V. A., Romantsova N. V., Tyarkin Ya. A. Providing the Adequacy of the Heat Metering System Model // Conf. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), St Petersburg, Russia, 29–31 Jan. 2024. IEEE, 2024. P. 324–326.
doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468386
10. Притула В. В. Подземная коррозия трубопроводов и резервуаров. М.: Акела, 2003. 225 с.
11. Гевлич С. О., Гевлич Д. С., Васильев К. А. Диагностика тепловых сетей и городских водопроводов // Технические науки – от теории к практике. 2015. Т. 45, № 9. С. 114–123.
12. Отставнов А. А., Харькин В. А. О стандартизированных трубных изделиях из реактопластов, армированных стекловолокном // Сантехника. 2014. № 2. С. 48–52.
13. ОСТ 153-39.4-010-2002. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений: утв. и введен в действие приказом Минэнерго России от 5 авг. 2002 г., № 255: дата введения 01.10.2002.
14. Чапаев Д. Б., Оленников А. А. Расчет скорости внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей из углеродистых сталей // Изв. высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. Т. 55, № 4. С. 33–36.
doi: 10.17073/0368-0797-2012-4-33-36
15. Результаты производственного контроля качества и безопасности горячей воды ТЭЦ филиала "Невский" ПАО ТГК-1 за 2020 г. URL: https://www.tgc1.ru/fileadmin/clients/spb/disclosure/2020/rezultaty_proizvodstvennogo_kontrolja_kachestva_i_bezopasnosti_gorjachei_vody_tehc_filiala_nevskii_v_sankt-peterburge.pdf (дата обращения: 04.04.2024).

Информация об авторах

Баронова Василиса Андреевна – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного

го электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – проектирование распределенных измерительных систем на основе ПЛК. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vasilisabaron@gmail.com

Романцова Наталия Владимировна – кандидат технических наук (2016), доцент (2023), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – проектирование распределенных измерительных систем на основе ПЛК; алгоритмическое обеспечение для расчета погрешности измерения при синтезе измерительных систем; обработка измерительных данных и преобразование измерительных сигналов; передача данных по беспроводным каналам при воздействии мощных помех.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: nvromantsova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

References

1. Alekseev V. V., Konovalova V. S., Romantsova N. V., Tsareva A. V. Information and Measuring System of the Control Node of the Main Heat Pipeline. *Soft Measurements and Computing*. 2022, vol. 54, no. 5, pp. 16–26. (In Russ.)
doi: 10.36871/2618-9976.2022.05.002
2. Kulikov A. N., Ugrevatov A. Yu., Uglov P. V. Mini-CHP Plants – Small Energy Facilities, and How to Automate Them. *Industrial and heating Boilers and Mini-TPP*. 2023, vol. 80, no. 5, pp. 26–29. (In Russ.)
3. Sosfenov D. A. Digital Twin: History of Origin and Development Prospects. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023, no. 4, pp. 35–43. (In Russ.)
doi: 10.25198/2077-7175-2023-4-35
4. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y.-S. Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-Twins Virtual Machine Tools for Cyberphysical Manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2017, vol. 10, pp. 1031–1042.
doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
5. Sun W., Lei S., Wang L., Liu Z., Zhang Y. Adaptive Federated Learning and Digital Twin for Industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021, vol. 17, no. 8, pp. 5605–5614.
doi: 10.1109/TII.2020.3034674
6. Jeon S. M., Schuesslbauer S. Digital Twin Application for Production Optimization. *IEEE Intern. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 14–17 Dec. 2020. IEEE, 2020, pp. 542–545.
doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309874
7. St Petersburg Heat Supply Scheme 2020. Vol. 1 (Pt. 1, 2.1). Available at: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/08/26/27/%D1%82%D0%BE%D0%BC_1_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8_1_2..pdf (accessed 04.04.2024). (In Russ.)
8. Regulation Diagram of Heat Supply from Nevsky branch TPP of TGC-1 in 2018–2019 Heating Period. Available at: https://energomonitring.com/wp-content/uploads/2019/02/2018_grafik_regulirovaniya_Teploset.pdf (accessed 04.04.2024). (In Russ.)
9. Baronova V. A., Romantsova N. V., Tyarkin Ya. A. Providing the Adequacy of the Heat Metering System Model. *Conf. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*, St Petersburg, Russia, 29–31 Jan. 2024. IEEE, 2024, pp. 324–326.
doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468386
10. Pritula V. V. *Podzemnaya korroziya trubo-provodov i rezervuarov* [Underground Corrosion of Pipelines and Reservoirs]. Moscow, Akela, 2003, 225 p. (In Russ.)
11. Gevlich S. O., Gevlich D. S., Vasiliev K. A. Diagnostics of Thermal Networks and Urban Water Pipes. *Technical Sciences - from Theory to Practice*. 2015, vol. 45, no. 9, pp. 114–123. (In Russ.)
12. Otsavnov A. A., Kharkov V. A. About Standardized Tubular Products Made of Fiberglass Reinforced Thermoplastics. *Plumbing*. 2014, no. 2, pp. 48–52. (In Russ.)
13. OST 153-39.4-010–2002 Methodology for Determining the Residual Resource of Oil and Gas Field Pipe-Lines and Pipelines of Head Structures. Approved and put into effect by the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation: 5 Aug. 2002: introduction 01.10.2002.
14. Chapaev D. B., Olennikov A. A. Calculation of Internal Corrosion Rate of Pipelines of Wather Thermal Networks from Carbon Steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, vol. 55, no. 4, pp. 33–36. (In Russ.)
doi: 10.17073/0368-0797-2012-4-33-36
15. The results of production control of the quality and safety of hot water at the Nevsky branch of PJSC TGC-1 for 2020. Available at: https://www.tgc1.ru/fileadmin/clients/spb/disclosure/2020/rezultaty_proizvodstvennogo_kontrolja_kachestva_i_bezopasnosti_gorjachei_vody_tehc_filiala_nevskii_v_sankt-peterburge.pdf (accessed 04.04.2024). (In Russ.)

Information about the authors

Vasilisa A. Baronova – master in Instrumentation Technology (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Information and Measurement Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: design of PLC-based distributed measurement systems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vasilisabaron@gmail.com

Natalia V. Romantsova – Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor (2023), Associate Professor of Department of Information and Measurement Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: design of PLC-based distributed measurement systems; algorithmic software for calculating measurement error in the synthesis of measurement systems; processing of measurement data and conversion of measurement signals; data transmission over wireless channels when exposed to powerful interference.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: nvromantsova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- электронную скан-копию рукописи (1 экз.) - файл статьи (pdf формат) с подписями всех авторов (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц текста с аннотацией, обзорной статьи не более 20 страниц текста с аннотацией);
- электронную копию статьи (1 экз., docx формат);
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены. Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- оригинал/скан-копию экспертного заключения о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах на русском и английском языках (1 экз., docx формат);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.). В письме должна быть отражена следующая информация: ФИО адресата и дата подачи рукописи; цель обращения и административная информация (заглавие рукописи, состав авторского коллектива, вид статьи); краткое изложение основных результатов исследования и описание их влияния на научное знание (1–2 абзаца); заявление об отсутствии подачи статьи в другие журналы и об отсутствии какого-либо конфликта интересов.

Принимаются к публикации статьи на русском и английском языках.

Рукопись не может быть опубликована, если она не соответствует предъявляемым требованиям и материалам, представляемым с ней.

Структура научной статьи

Авторам настоятельно рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи;
- авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
- место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
- аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
- ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
- источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
- благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
- конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).

- Заголовочная часть на английском языке:
 - название (Title);
 - авторы (Authors);
 - место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация (Abstract);
 - ключевые слова (Keywords);
 - источник финансирования (Acknowledgements);
 - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
- Приложения (при наличии).
- Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
- Список литературы (библиографический список);
- Информация об авторах.

Название статьи должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

Авторство и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

Аннотация представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

Введение. Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

Цель работы. Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

Материалы и методы. Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

Результаты. Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

Обсуждение (Заключение). Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

Текст статьи излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

Введение. Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

Методы. Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

Обсуждение (Заключение и Выводы). В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

Список литературы (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации

оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее и нижнее 2.5 см, левое и правое 2.25 см; колонтитулы – верхний 1.5 см, нижний 2.5 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта основного текста 11 pt, остальных сведений 10 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует номенклатуре научных специальностей:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

- 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.
- 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.
- 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.
- 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений).
- 2.2.5 – Приборы навигации.
- 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

2.2.7 – Фотоника.

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

2.2.9 – Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и нанoeлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 28 № 2 2025

Vol. 28 No. 2 2025

Научные редакторы А. М. Мончак, П. В. Апалина
Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Компьютерная верстка Е. И. Третьяковой

Science Editors A. M. Monchak, P. V. Apalina
Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek
DTP Professional E. I. Tretyakova

Подписано в печать 25.04.25. Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Уч.-изд. л. 15.86. Печ. л. 15.25. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 42.

Цена свободная.

Signed to print 25.04.25. Sheet size 60×84 1/8.

Educational-ed. liter. 15.86. Printed sheets 15.25. Number of copies 300.

Printing plant 1–150 copies. Order no. 42.

Free price.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

ETU Publishing house
5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia